

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2010

Bc.Martin Urbaniec

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra energetiky**

**Měření s impulsním generátorem napětí**  
**Measuring with Surge Generator**

2010

Bc.Martin Urbaniec

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Datum:

Podpis:

## Abstrakt

V této diplomové práci budeme seznámeni s impulsním generátorem napětí SGSA, jeho funkcí a využití v praxi. Práce je rozdělena na úvod, tři kapitoly, ve kterých se seznámíme s impulsním generátorem a způsobu provedení zkoušky výdržným napětím, a závěr.

První kapitola se zaměřuje jednak na popis a tvar zkušebního atmosférického impulsu napětí a možnosti provádění zkoušek výdržným napětím podle norem, ale hlavně na impulsní generátor napětí SGSA. Je zde popsána jeho konstrukce a možné způsoby jeho zapojení, náhradní schéma zapojení a matematický model. Nechybí ani popis ostatních komponentů, které jsou nedílnou součástí pro jeho správnou funkci.

Druhá kapitola obsahuje popis měření výdržného napětí na měřeném objektu. Je zde uvedeno blokové schéma zapojení, skutečné zapojení impulsního generátoru a místo kde měření probíhalo. Měření proběhlo na skleněném závěsném izolátoru ruské výroby.

V poslední kapitole jsou zaznamenány výsledky měření přeskokového napětí na závěsném skleněném izolátoru a zhodnocení celého měření.

## Klíčová slova

Přeskokové napětí, výdržné napětí, Atmosférický impuls, impulsní generátor.

## **Abstract**

In this thesis we are familiar with the pulse voltage generator SGSA, its function and use in practice. The thesis is divided into an introduction, three chapters in which we meet with a pulse generator and method of test withstand voltage, and conclusion.

The first chapter focuses on the description and the shape of the atmospheric test pulse voltage and the possibility of carrying out the tests withstand voltage according to the standards, but mainly on the impulse voltage generator SGSA. It describes the structure and possible ways of its involvement, alternative diagram and mathematical model. There is also a description of other components that are integral to its proper function.

The second chapter contains a description of the measurement withstand voltage to the measured object. There is shown a block diagram, the actual involvement of a pulse generator and the location where measurements were made. Measurements took place on the glass suspension insulators of Russian production.

The last chapter is recorded measurements sparking voltage to hang a glass insulator and an assessment of all measurements.

## **Key words**

Sparking voltage, withstand voltage, lightning impulse, impulse generator.

## Použité symboly a zkratky

$C_S$	(F)	Kondenzátor nabíjecí
$C_L$	(F)	Kondenzátor vybíjecí
$i$	(A)	Elektrický proud
$L$	(H)	Indukčnost
$R_P$	( $\Omega$ )	Paralelní rezistor
$R_S$	( $\Omega$ )	Sériový rezistor
$R_{SI}$	( $\Omega$ )	Vnitřní sériový rezistor
$R_{SE}$	( $\Omega$ )	Vnější sériový rezistor
$T_{\check{C}}$	( $\mu s$ )	Doba čela napěťové vlny
$T_P$	( $\mu s$ )	Doba půl týlu napěťové vlny
$t$	(s)	čas
$U$	(V)	Napětí
$U_{10}$	(V)	10 % přeskokového napětí
$U_{50}$	(V)	Polovinové přeskokové napětí
$U_P$	(V)	Přeskokové napětí
$u_c$	(V)	Napětí na kondenzátoru

# Osnova

<b>1. Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Charakteristika zkoušek atmosférickým impulsem a generátor SGSA.....</b>	<b>2</b>
2.1 Zkoušky atmosférickým impulsem .....	2
2.2 Atmosférický impuls .....	4
2.3 Generátor SGSA .....	7
2.3.1 Hlavní rysy generátoru SGSA.....	9
2.3.2 Bezpečnost provozu .....	9
2.3.3 Zapojení impulsního generátoru.....	10
2.3.4 Překmit impulsu a jeho kompenzace.....	12
2.3.5 Řídicí systémy .....	14
2.3.6 Napájení usměrňovacího obvodu .....	16
2.3.7 Rezistory .....	16
2.3.8 Kondenzátory a dělič napětí.....	17
2.4 Matematický model SGSA .....	18
2.5 Způsoby zapojení impulsního generátoru napětí .....	20
<b>3. Návrh laboratorní měřicí úlohy s generátorem SGSA.....</b>	<b>23</b>
3.1 Místo měření .....	23
3.2 Schéma zapojení .....	24
3.3 Seznam použitých přístrojů.....	24
3.4 Zapojení generátorů pro jednotlivá měření .....	25
3.5 Bezpečnostní pokyny .....	26
3.6 Uvedení generátoru do provozu .....	27
3.7 Teoretický rozbor .....	28
3.8 Postup měření.....	29
3.9 Vzorová tabulka pro měření .....	30
3.10 Výpočty parametrů pro zapojení SGSA.....	30
3.11 Namodelovaný atmosférický impuls v programu ATP.....	31
<b>4. Měření a zpracování zkušebního protokolu .....</b>	<b>32</b>
4.1 Měření v zapojení S7 .....	32
4.2 Měření v zapojení S2P2 .....	34
4.3 Měření v zapojení S4 .....	35
4.4 Grafy .....	37
4.5 Vyhodnocení polovinového přeskokového napětí .....	37
4.6 Zhodnocení.....	39
<b>5. Závěr .....</b>	<b>40</b>
<b>6. Literatura.....</b>	<b>41</b>
<b>Příloha A: Parametry impulsního generátoru .....</b>	<b>42</b>
<b>Příloha B: Příslušenství generátoru .....</b>	<b>43</b>
<b>Příloha C: Zapojení impulsního generátoru.....</b>	<b>44</b>
<b>Příloha D: Modely v programu ATP .....</b>	<b>52</b>

# 1. Úvod

Elektrická energie v dnešní době je nezbytnou součástí každé domácnosti. Je tedy důležité zajistit nepřetržitou dodávku od zdroje elektrické energie ke spotřebiteli. Tuto dodávku zajišťuje přenosová soustava. V počátcích elektrifikace se stal hlavní příčinou výpadku elektrického proudu, úder blesku do vedení přenosové soustavy a přechodové jevy, které vznikají při manipulaci v elektrizační soustavě.

Aby bylo vedení chráněno před úderem blesku, muselo se prvně lidstvo naučit fyzickou podstatu vzniku blesku a umět nasimulovat blesk. Pro simulaci blesku slouží právě impulsní generátory. Díky těmto generátorům je dnes možné určit, jak vysoké napětí jsou schopny snést jednotlivé prvky izolace v elektrizační soustavě a také určit pravděpodobnost šíření přepětí po těchto prvcích. Tyto generátory mohou také simulovat přepětí, které vzniká při odpojování nebo připojování zdrojů elektrické energie nebo jiné manipulaci. V dnešní době je přenosová soustava dostatečně chráněna před účinky úderu blesků do vedení nebo jeho blízkosti.

Impulsní generátory slouží také k otestování stavu izolace různých izolačních prvků. Nejčastěji zkoušeným prvkem je Izolátor. Čím kvalitnější je stav izolátoru, tím je menší pravděpodobnost vzniku poruchy. Způsoby testování výdržným nebo přeskokovým napětím, jsou stanoveny v normách. Tyto metody jsou vysvětleny v první kapitole společně s popisem atmosférického impulsu, který se pro zkoušky používá. Další část této kapitoly popisuje impulsní generátor typu SGSA. V následujících kapitolách je uveden průběh zkoušky atmosférickým impulsem, zaznamenané hodnoty z měření a následné vyhodnocení.



## 2. Charakteristika zkoušek atmosférickým impulsem a generátor SGSA

### 2.1 Zkoušky atmosférickým impulsem

Existuje několik metod provádění zkoušek atmosférickým impulsem. Aby byla zkouška provedena co nejpřesněji, musíme provést správné určení měřené metody a začlenit měřený objekt do správné skupiny izolace.

Výboj, který vznikne, můžeme rozdělit do 3 skupin:

1. Průrazný výboj – dochází k porušení izolace při elektrickém namáhání, výboj přemostí izolaci a napětí klesne k nule
2. Neúplný průrazný výboj – nedochází k porušení izolace, výboj přemostí izolaci dočasně a napětí poklesne k nule, ale dojde k obnovení izolace
3. Neprůrazný výboj – mezi vnitřními elektrodami nebo vodiči nedojde k poklesu napětí

Zkušební postup závisí na povaze objektu. Jsou čtyři postupy zkoušky výdržným napětím podle normy ČSN IEC 60-1: Technika zkoušek vysokým napětím, označovány A, B, C, D. První tři (A, B, C) jsou pro napětí, které se přikládá na zkoušený objekt a stanovujeme jen výdržnou hodnotu, zatím co u D používáme několik napěťových hladin [1].

Popis metod měření výdržných napětí atmosférickým impulsem 1,2/50  $\mu$ s:

- **Zkouška typu A** – Na objekt přivedeme 3 impulsy určitého tvaru a polarity na hladině jmenovitého výdržného napětí. Pokud nedojde ani jednou k přeskoku napětí, měřený objekt splňuje dané požadavky. V případě vzniku přeskoků objekt nevyhověl a není vhodný pro danou napěťovou hladinu. Tato zkouška se používá pro zkoušení degradující nebo samočinně se neobnovující izolace (kabely, tlumivky, kondenzátory).
- **Zkouška typu B** – Na objekt se přivede 15 impulsů určitého tvaru a polarity na hladině jmenovitého výdržného napětí. Pokud nedojde k více jak ke dvěma přeskokům napětí v obvodu s izolací, objekt splňuje dané požadavky. Tato zkouška se používá pro zkoušení samočinně se neobnovující izolace.
- **Zkouška typu C** – Na objekt přivedeme 3 impulsy určitého tvaru a polarity na hladině jmenovitého výdržného napětí. Pokud dojde k více přeskokům, objekt nevyhověl. Pokud dojde jen k jednomu přeskoku napětí, přiložíme dalších 9 impulsů. Jestli-že teď nedojde ani k jednomu přeskoku napětí, objekt vyhověl. Tento typ se používá v Americe pro měření neobnovující se izolace.

- **Zkouška typu D** – Pomocí této zkoušky vyhodnocujeme 10 % přeskokového napětí  $U_{10}$  pomocí použití statických zkoušek podle metody více hladin nebo nahoru-dolu, nebo ji vypočteme ze vztahu:

$$U_{10} = U_{50} \cdot (1 - 1,3 \cdot z) \quad (1)$$

kde  $z$  – odchylka přeskokového napětí, většinou se volí  $0,03 U_{50}$ .

Měřený objekt vyhovuje pokud  $U_{10}$  je větší než stanovené výdržné impulsní napětí. Hodnotu  $U_{50}$  zjistíme měřením podle metody nahoru-dolu nebo metody více hladin. Je doporučeno vyhodnotit  $U_{10}$  pomocí metody nahoru-dolu se 7 impulsy na skupinu a minimálně volíme 8 skupin. Tato metoda se používá pro zkoušení obnovujících se izolace (isolátory, bleskojistky, transformátorový olej, systémy izolované plynem).

Pokud chceme, aby měření bylo co nejpresnější, musíme určit pořadí zkoušek, polaritu, počet přiložených napětí a interval mezi nimi s ohledem na tyto činitele:

- Požadovaná přesnost.
- Možnost zkreslení při opakovaném přiložení napětí.
- Náhodný charakter sledování jevů a případná závislost měřených charakteristik na polaritě.

Protože se jedná o zkoušky atmosférickým impulsem je také důležité při zkoušení vytvořit stejné podmínky, ve kterých bude měřený prvek. Proto se provádí zkoušky:

- 1) **Zkouška za sucha** – Zkouška se bude provádět za sucha. To znamená, že objekt je čistý a suchý a zkouší se za normální teploty okolí. Pro přesnější měření je vhodné také elektrody kulového jiskřiště očistit a měly by mít co nejhladší povrch. Tato zkouška patří k nejjednodušším zkouškám. Je však vhodná pouze pro přístroje, které nejsou vystaveny atmosférickým podmínkám (izolační prvky pro staniční nebo kryté rozvodny a transformátorovny). Existuje ještě zkouška za deště a zkouška umělým znečištěním, které nalezneme v normě ČSN IEC 60-1: Technika zkoušek vysokým napětím. Tyto zkoušky simulují atmosférické vlivy na měřeném objektu jako například déšť a znečištění při provozu.
- 2) **Zkouška za deště** – Při zkoušce za deště je měřený objekt obstříkovan vodou s předepsanou hodnotou elektrického odporu a teploty (tyto hodnoty jsou v tabulkách normy ČSN IEC 60-1: Technika zkoušek vysokým napětím). Kapky vody dopadající na měřený objekt musí být nasměrovány tak, aby horizontální a vertikální složky deště byly stejné. Intenzita obou složek deště se měří pomocí sběrné nádoby s otvorem 100 až 750 cm<sup>2</sup>. Nádoba se umísťuje blízko spodní části měřeného objektu tak, aby nezachycovala stékající kapky z objektu, a při měření se pomalu pohybuje pod celým objektem, aby zachytila kapky z různých míst měřeného objektu. Pokud je objekt větší než 1 m a menší než 3 metry, rozdělí se na 3 stejné měřicí úseky, které proměříme samostatně.

V případě větší výšky než 3 m objekt rozdělíme na více částí. Je to z důvodu otestování celého objektu a ne jen několik jeho částí.

- 3) **Zkouška umělým znečištěním** – Třetí zkouška je zkouška umělým znečištěním, díky které získáme informace jak se chová povrch izolace za podmínek znečištění v provozu. Izolátor se před měřením pečlivě umyje a nanese na něj vrstvu znečištění při současném nebo pozdějším přiložení napětí. Touto zkouškou určíme maximální stupeň znečištění, které vyhovuje při určitém napětí, nebo naopak při určitém výdržném napětí stanovíme stupeň znečištění. Měření se provádí dvěma metodami:
- a) **Metoda slané mlhy** – Objekt je umístěn do speciální komory, která se plní slanou mlhou. Teplota uvnitř při začátku měření by měla být větší než 5 stupňů, ale nesmí překročit teplotu 30 stupňů. Než začneme měřit, objekt zvlhčíme vodou a pak zapneme systém vytváření slané mlhy. Zároveň přiložíme výdržné napětí po dobu 1 hodiny, pokud nedojde k přeskoku. Aby bylo měření co nejpřesnější, minimální vzdálenost objektu od okolí musí být 0,5 m na 100 kV.
  - b) **Metoda zkoušek předem nastavenou vrstvou znečištění** – u této metody na očištěný izolátor nanese vodní suspenzi znečištění a necháme ji vyschnout. Teplota je stejná jako při první metodě, akorát po vyschnutí měřený objekt zvlhčujeme mlhou do teploty 40 °C. Napětí přiložíme buď při zvlhčování a držíme na konstantní hodnotě, dokud nedojde k přeskoku, nebo při maximální vodivosti povrchu (přibližně po době 20 až 40 minut) po dobu 15 minut dokud nedojde k přeskoku.

Měření můžeme opakovat, ale před každým novým měřením musíme izolátor pečlivě umýt.

**Objekty, na kterých se provádí zkoušky výdržným napětím:**

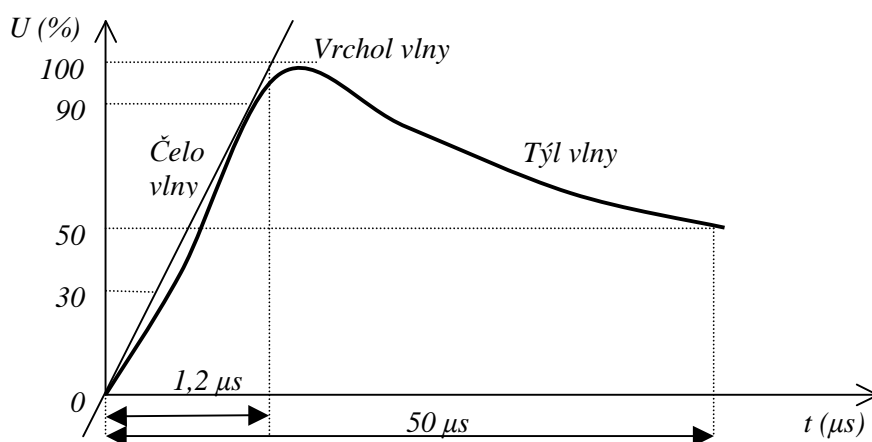
- Izolátory podpěrné, závěsné, skleněné.
- Bleskojistky a omezovače přepětí.
- Průchodky a kondenzátory.
- Výkonové tlumivky.
- Kabely a kabelové soubory.

## **2.2 Atmosférický impuls**

Pro zkoušky vysokým napětím se používají impulsní zdroje, jejichž úkolem je co nejvěrněji simulovat podmínky při vzniku přepětí. Impuls má povahu rázové vlny, což je zpravidla jednosměrná vlna přepětí vzrůstající rychle na nejvyšší hodnotu a pak pomalu klesají k nule. Oproti tomu spínací vlna napětí vzrůstá plynule na nejvyšší hodnotu a v týlu vlny klesá k nule. Přeskok tedy může nastat ve stoupající části vlny (useknutá vlna v čele většinou mezi 2 až 5  $\mu$ s), ve vrcholu, nebo také v klesající části (vlna useknutá v týle) [1], [6].

Pro simulaci atmosférického přepětí se používá normalizovaný atmosférický impuls napětí, který je určen polaritou, napětím, dobou čela a půl týlu. Způsob určení doby čela  $T_c$  ( $1,2 \mu s$ ) a doby půl týlu  $T_p$  ( $50 \mu s$ ) spolu s jejich povolenými tolerancemi a toleranci amplitudy ukazuje (obr. 2.1) [5].

Doba náběhu impulsu napětí  $1,2/50$  je  $2 \mu s$ , a doba poklesu zkušební napětí na polovinu (doba půl týlu) je  $50 \mu s$ . Dielektrická pevnost izolačního materiálu závisí jak na maximální hodnotě, tak i na průběhu zkušební napětí. Testování materiálů napětovým impulsem  $1,2/50 \mu s$  probíhá ve dvou fázích: zkouškou odolnosti proti průrazu strmým nárůstem napětí a zkouškou chování při dlouhodobém přetížení. Ve skutečnosti k většině průrazů materiálu dochází až při dlouhodobém přetížení, tedy v klesající části zkušební impulsu.



Obr. 2.1 Zkušební normalizovaný atmosférický impuls  $1,2/50 \mu s$

#### Náběh vlny:

Čelo vlny – část vlny napětí nebo proudu před vrcholem

Doba vrcholu – časový interval mezi počátkem vlny a jejím vrcholem (šipka  $1,2 \mu s$ )

Doba čela vlny – je to 1,67 násobek doby vzrůstu proudu mezi body 10 % a 90 %

Doba trvání vrcholu napětí – časový interval, v němž je napětí vyšší než 0,9 násobek vrcholové hodnoty

Strmost čela vlny – poměr vrcholové hodnoty a doby čela vlny

#### Týl vlny:

Část vlny napětí za vrcholem

Doba půl-týlu vlny:

Časový interval mezi počátkem vlny a okamžikem v týlu kdy napětí pokleslo na polovinu vrcholové hodnoty (šipka  $50 \mu s$ )

#### Tolerance:

Vrcholová hodnota  $\pm 3 \%$

Doba čela  $\pm 30\%$

Doba půl týlu  $\pm 20\%$

Pro zkoušky napětí s frekvencí 50 a 60 Hz, musí být dodrženo:

Zkušební napětí má sinusový tvar kmitočtu 45 až 65 Hz, odchylka mezi vrcholovou a efektivní hodnotou je  $\sqrt{2} \pm 5\%$

Odchylka měřené hodnoty zkušebního napětí je  $\pm 1\%$ , pokud trvá zkouška déle než 60 s  $\pm 3\%$

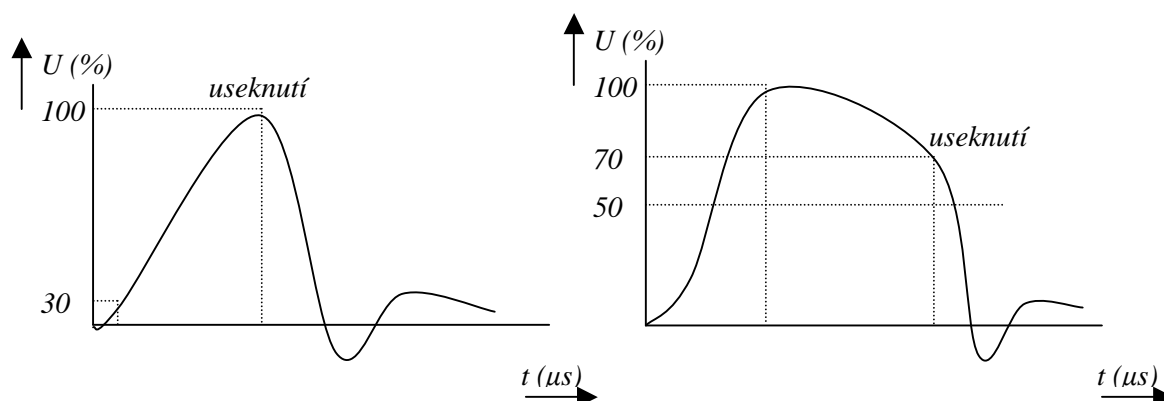
Podle doby useknutí se impuls dělí:

Useknutý atmosférický impuls v čele (obr. 2.2 - vlevo)

Useknutý atmosférický impuls v týlu (obr. 2.2 - vpravo)

Kromě klasického Atmosférického impulsu existuje dále oscilační impuls, který má kratší dobu čela a k nule klesá tlumenými oscilacemi o frekvenci 15 až 400 kHz se změnou polarity nebo bez ní.

Rázovými zkouškami se musí zkoušet všechna elektrická zařízení, která jsou vystavena účinkům atmosférických přepětí, aby se zjistila jejich odolnost proti rázovým vlnám. Průběh rázové vlny je určen rozložením indukčností a kapacit vedení (velká indukčnost a malá kapacita způsobí, že je čelo vlny velmi strmé)



**Obr. 2.2 Atmosférický impuls useknuty v čele (vlevo) a v týlu (vpravo)**

Pokud je napětí dostatečně vysoké dochází k useknutí v čele vlny nebo už v době náběhu vlny. Useknutí v týlu vlny dochází při nižších napětích, které potřebují delší dobu pro vytvoření přeskoku.

Pokud je napětí dostatečně vysoké dochází k useknutí v čele vlny nebo už v době náběhu vlny. Useknutí v týlu vlny dochází při nižších napětích, které potřebují delší dobu pro vytvoření přeskoku.

Naše měření by mělo probíhat za normálních atmosférických podmínek, teplota 20°C, tlak 101,3 kPa, vlhkost 11 g/m<sup>3</sup>. Se zvýšením vlhkosti nebo hustoty vzduchu se zvyšuje šance přeskokového napětí. Při testování musí být objekt kompletně sestaven a jeho zacházení by mělo odpovídat normálnímu provozu. Přeskokové charakteristiky mohou být ovlivněny místem, ve kterém se zkouška koná (uspořádání vysokonapěťových přívodů, vzdálenost od jiných živých částí nebo uzemnění, výška nad zemí). Vliv blízkosti okolních konstrukcí můžeme zanedbat, pokud je objekt od nich vzdálen 1,2 násobku délky, nejkratší možné výbojové délky na zkoušeném objektu.

## 2.3 Generátor SGSA

Impulsní generátor napětí vyrábí firma Haefely. Kromě typu SGSA vyrábí ještě další dva typy pro měření vyšších výdržných napětí.

Rozdělení [2]:

- **SGSA** – Tento systém impulsní zkoušky může být používány pro generování impulsu napětí simulující údery blesku a spínací přepětí. Velikost energie na 1 stupeň je 5 kJ. Nabíjecí napětí 800 kV. Základní systém lze vylepšit pro speciální testy a lepší ovládání. Řada dalších okruhů a komponenty umožňují úpravu impulsu testovacího systému pro testy na různé druhy objektů pro vysoké napětí.
- **SGDA** – Tento systém impulsní zkoušky může být používány pro generování impulsu napětí simulující údery blesku a spínací přepětí. Velikost energie na stupeň je 5 nebo 10 kJ. Nabíjecí napětí je 3 MV. Základní systém lze vylepšit pro speciální testy a lepší ovládání. Řada dalších okruhů a komponenty umožňují upravovat impuls testovacího systému pro testy na různé druhy objektů pro vysoké napětí. Generátor díky své jedinečné, modulární a patentovaná konstrukce D-generátor (tvar těla tvoří také konzole pro kulové jiskřiště), se jednoduše rozkládá a snadno přepravuje.
- **SGVA** – Tento systém impulsní zkoušky může být použit pro generování impulsu napětí simulující údery blesku a spínací přepětí. Velikost energie na stupeň je až 30 kJ. Nabíjecí napětí je až 10 MV. Základní systém lze vylepšit různými způsoby pro speciální testy a lepší ovládání. Řada dalších okruhů a komponentů umožňuje upravit impuls testovacího systému pro testy na různé objekty pro vysoké napětí. Generátor je doplněn o vnitřní žebřík a skladovací prostor pro další odporníky k přizpůsobení tvaru vlny.

Všechny generátory slouží pro testování podle norem IEC, ANSI / IEEE, ČSN.



**Obr. 2.3 Konstrukce generátorů (zleva SGSA, SGDA, SGVA)**

SGSA systémy pro impulsní zkoušky můžou být použity pro generování impulsního napětí od 100 kV do 700 kV. Tento generátor simuluje údery blesku a spínací přepětí. Celkové nabíjecí napětí je v rozsahu od 100 kV do 700 kV s energií na stupeň 5 kJ (pro sedmistupňové zapojení sériové je to pak 35 kJ). Generátor je navržen pro vytvoření zkušebních impulsů tvaru 1,2/50 a 250/2500  $\mu$ s. Systém je postaven na základě získaných zkušeností, které se využívaly při stavbě předchozích modelů už od roku 1932. Využívá se pro aplikace testování podle norem ČSN, IEC, ANSI / IEEE a jiných vnitrostátních norem. [3]

Základní systém lze vylepšovat různými způsoby pro speciální zkoušky, nebo větší a snadné ovládání. Řada dalších okruhů a komponentů umožňuje optimalizování impulsu testovacího systému pro zkoušky:

- Distribučních transformátorů.
- Malých výkonových transformátorů.
- Kabelů (typové zkoušky).
- Přepětí (test impulsním proudem).
- Motorů / generátorech.
- Izolátorů.
- Průchodek a koncovek.
- Přístrojových transformátorů.

SGSA systémy mohou být vybaveny hydraulickým systémem zvedání, nebo může být namontován na přívěs pro lepší přepravu. Konstrukce systému pro impulsní zkoušky SGSA je lehká a flexibilní a díky konstrukci on-site jej můžeme používat v menších prostorách. Je vybaven kolečky pro přemístění, proto vyhovuje pro experimentální měření v laboratořích nebo vysokých školách. Pro převoz na místo zkoušky jej lze snadno přemístit, zvláště když je

vybavený spínacími a hydraulickými mechanismy. Výrobce si dal také záležet na vzhledu. Díky barevnému značení sériových a paralelních rezistorů je námi zapojený okruh lépe přehledný.

### 2.3.1 Hlavní rysy generátoru SGSA

- Celkové nabíjecí napětí od 100 kV do 700 kV.
- Energie na 1 stupeň 5 kJ.
- Spolehlivé a přesné spouštění pomocí zdokonalené Marxova zapojení.
- Snadná obsluha s mikroprocesorovým systémem kontroly.
- Vybaven odpory pro simulaci úderu blesku a spínací impuls napětí.
- Unikátní ochranné uzemňovací zařízení.
- Geniální rozšíření rozsahu zatížení.
- Krátká doba přestavby (šikovné plug-in rezistory a propojování).
- Sériové rezistory mohou být zaměněny s paralelními odpory.
- K dispozici jsou různé druhy základových rámců.
- Izolace kondenzátorů jsou vyrobeny z ricinového oleje, který je šetrný k životnímu prostředí (bez PCB).
- Speciální řešení pro jedinečné požadavky zákazníků.
- Komunikace mezi měřícím systémem a ovládáním zvyšuje účinnost práce se zkušebním napětím.

### 2.3.2 Bezpečnost provozu

Návrh testovacího systému, a zejména řídicí systém je v souladu s normami VDE 0104. Byla zvýšena ochrana proti nehodám použitím uzemňovacího systému. Obsluha musí být poučena o bezpečnosti při práci na impulsním generátoru. Generátor je také vybaven ochranou testovacích objektů a testovacích systémů. Testovací systém bude vypnut v případě přepětí, nadproud, a výskytu rychlého přechodového napětí. Testovací systém je nepřetržitě monitorován v průběhu zkušebního provozu. Moderní kontrolní systém umožňuje velmi pohodlnou a flexibilní kontrolu zkušebního impulsu. Kontrolní systém je celý vlastní konstrukce a výroby. Bezpečnostní funkce jsou implementovány v hardwaru nezávislé na softwaru.

#### **Intervaly impulsů:**

Při zkoušce s maximálním nabíjecím napětím musí být mezi jednotlivými intervaly doba, po kterou musí být generátor v klidu. Minimální doba mezi jednotlivými impulsy je uveden v tabulce SGSA v systémových datech. Tato doba je omezena tepelnými účinky nabíjecího proudu, protékajícího přes paralelní rezistory a energii, která vznikne na kondenzátorech. Pokud se nabíjecí napětí sníží, interval mezi impulsy bude kratší.



**Podmínky okolního prostředí:**

Impulsní generátor může být provozován při okolních teplotách mezi 0 °C a 45 °C a relativní vlhkosti 95 % (nesmí dojít ke kondenzování vody). Řídicí a měřicí zařízení je určeno pro provoz při okolní teplotě 0 °C až 45 °C a relativní vlhkosti mezi 35 % a 80 %. Přípustná teplota a vlhkost pro přepravu a skladování všech částí je –20 °C až 60 °C a 95 % vlhkost (nesmí dojít ke kondenzování vody). Hodnoty pro zkušební napětí za standardních podmínek jsou uvedeny v dokumentaci tj.  $\theta = 20\text{ °C}$ ,  $b = 1013\text{ mbar}$  a vlhkost je 80 %. Tyto hodnoty platí pro provoz systému ve výškách do 1000 m nad mořem. Nad tuto výšku se napětí snižuje o 1 % na každých 100 m.

**Odolnost proti elektromagnetickému rušení:**

Vznik elektromagnetického rušení při testování impulsním napětím je nevyhnutelné. Zkouška SGSA systému je navržena zejména pro snížení vlivu rušení elektromagnetického pole, díky vyvážovací funkci kontroly a elektronického měřicího přístroje. Měřicí a regulační linky jsou správně stíněné a uzemněné. Vstupy a výstupy jsou chráněny proti přepětí. Komponenty systému jsou tvořeny vhodným materiálem, jako je měděný kabel nebo fólie, aby udržely zemnicí potenciály na bezpečné úrovni. Pro měření signálu z vysokého napětí se připojuje dělič v rozmezí 100 až 1600V, aby byla zajištěna vysoká kvalita signálu a omezen šum.

### 2.3.3 Zapojení impulsního generátoru

Minimální výstupní napětí je 100 kV. Toto je dosaženo pouze v zapojení s jedním stupněm. Další zapojení vytvoříme pomocí sérioparalelních kombinací jednotlivých stupňů. Maximální výstupní napětí je 700 kV. Způsoby zapojení jsou 7 stupňů v sérii, 7 stupňů paralelně a sérioparalelní kombinace S3 P2, S2 P3 a S2 P2. Schematické zapojení okruhů je znázorněno v kapitole 2.5.

Testovací systém se skládá z následujících hlavních komponentů:

- Nabíjecí usměrňovač.
- Impulsní generátor.
- Řídicí systém.
- Dělič.

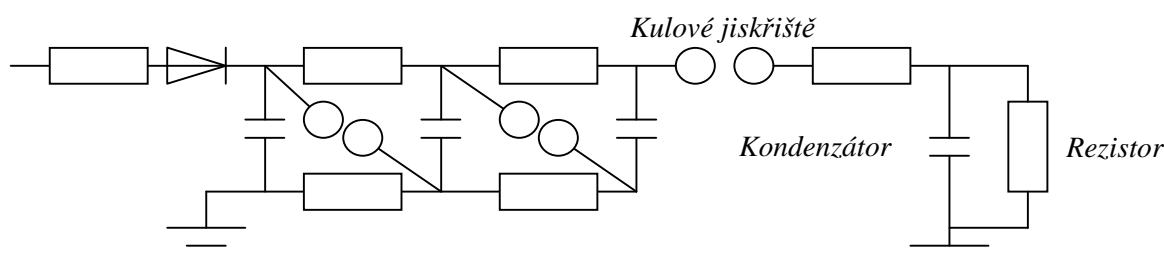
Příslušenství pro další měření, testování a analýzy tvaru vlny jsou:

- Bočník.
- Kulové jiskřiště.
- Měřicí systém.

Blokové schéma níže (obr 2.5), ukazuje základní funkce systému. Impuls testovacího systému je řízený řídicím systémem, který potlačuje nabíjení stupně z impulsního generátoru. Jednotlivé

stupně, podle toho jak jsou zapojeny, jsou napájeny z impulsního generátoru přes paralelní nabíjecí rezistory. Doba nabíjení a nabíjecí napětí může být nastavena. Jakmile nastavené nabíjecí napětí bylo dosaženo, impulsní generátor vyšle impuls, který se uzavírá přes první kulové jiskřiště. Výsledné přepětí vytváří další přeskočky na kulových jiskřících v jednotlivých stupních. Výsledné přepětí je tvořeno sériovým součtem připojených stupňů. Dělič napětí upravuje impuls napětí na hodnotu, která vyhovuje pro měření a zaznamenávání. Impulsní generátor je hlavním zdrojem impulsního napětí testovacího systému. SGS generátor se skládá z několika kondenzátorů (Marxovo zapojení) spojených tak, aby bylo na jejich konci napětí 100 kV.

Marxovo zapojení impulsního generátoru napětí je znázorněno na (obr. 2.4). Kondenzátory jsou přes jednocestný usměrňovač nabíjeny paralelně přes nabíjecí odpory. Pokud budou spínací jiskřiště nastavena těsně nad hodnotu nabíjecího napětí, pak stačí sepnout jediné z nich a sériovým spojením kondenzátoru se na sousedních jiskřících objeví dvounásobné napětí, tato jiskřiště ihned sepnou a na dalších jiskřících tak napětí dále narůstá. Všechna jiskřiště sepnou lavinově prakticky ve stejném okamžiku. Zpravidla je nejprve spínáno první jiskřiště u zdroje, neboť se nachází na nejnižším potenciálu vůči zemi. Podle počtu stupňů je výstupní napětí násobkem nabíjecího a takto sériově spojené kondenzátory se vybíjejí přes čelní a tylní odpor do výstupního kondenzátoru.[4]



Obr. 2.4 Marxovo zapojení IGN

### Impulsní obvod:

Teoreticky pro generování a tvarování impulsních proudových vln z generátoru impulsu stačí mít jen různé odpory a indukčnosti. V praxi je nutné vědět přesně, jaký tvar vlny lze použít pro daný měřený objekt, podle nichž norma udává maximální kapacitní zátěž a zbytkové napětí. Pomocí těchto informací je možné vypočítat, jestli je možné nastavit impulsní generátor napětí tak, aby vydával ty správné impulsní vlny. Pro atmosférický proudový impuls 8/20  $\mu$ s podle normy IEC 60-1 je tento generátor vhodný.

Doporučené provádění zkoušek:

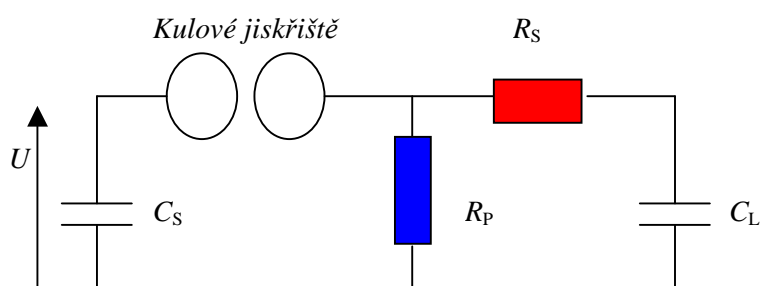
- Oscilační atmosférický impuls (OLI) Max. náběhu 15  $\mu$ s.
- Oscilační spínání impulsem (OSI), náběhu 150  $\mu$ s až 10  $\mu$ s.

SGSA-L impulsní testovací systém obsahuje následující:

- Sada rezistorů pro spínací impuls.
- Indukční moduly pro generování OLI.
- Indukční moduly pro generování OSI.
- Speciální typ děliče CSL.

Oscilační kmitočet je určen indukčností v generátoru a kapacitou zkoušeného vzorku. Kromě děliče napětí je nutné, aby kapacitní zátěž byla alespoň 2 nF pro správnou funkci řídicího systému. Indukčnosti jsou vyrobeny z modulů tak, aby vyhovovaly jmenovitému napětí generátoru. Každý modul se skládá s cívky navinuté na izolační trubičku.

Indukčnosti jsou uspořádány horizontálně mezi generátor a dělič. Výhodou oproti rezonančním impulsním generátorům je, že je menší a lehčí. Tím impulsní generátory mohou být použity k výrobě stejných špičkových hodnot (tj. 600kV generátor může produkovat oscilační spínací impulsy cca. 1000 kV). Sady rezistorů jsou k dispozici ke generování spínacího impulsu 250/2500  $\mu$ s definovaného v normě IEC 60-1.

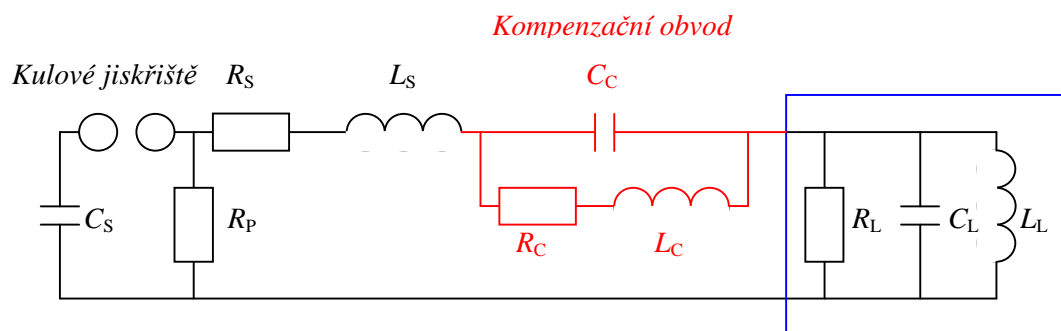


Obr. 2.5 Náhradní schéma impulsního generátoru napětí

### 2.3.4 Překmit impulsu a jeho kompenzace

Nejdůležitější rozdíl mezi kompenzovaným překmitem a skutečným ekvivalentním překmitem je zvážení dalších prvků akumulované energie. Indukčnost zkušebního okruhu nelze redukovat (z fyzikálního hlediska je to nemožné), ale další obvod se může zjednodušit. Rezistor  $R_C$  (včetně  $L_C$ ) a kapacita zkoušeného objektu  $C_L$  tvoří dolní propustní filtr. Vyšší frekvence (oscilace), bude oslabené více než nižší frekvence (samotný impuls) pomocí low-pass-filtru.

Realizace kompenzace překmitu impulsního generátoru typu SGS je možné pomocí externích konstrukčních částí. Toto řešení se dá použít také pro "Non-Haefely-generátory. Výhodou kompenzace překmitu impulsního generátoru je rozšíření rozmezí zatížení pro impulsní napětí.

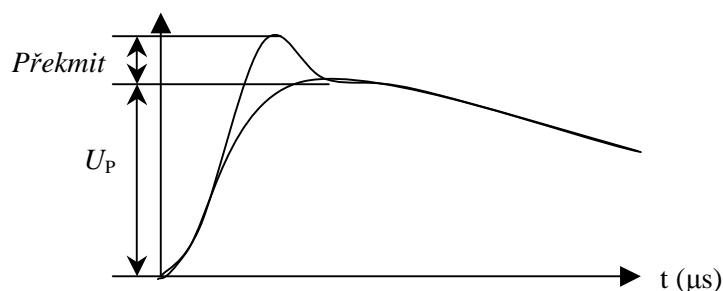


Obr. 2.6 Realizace kompenzace překmitu

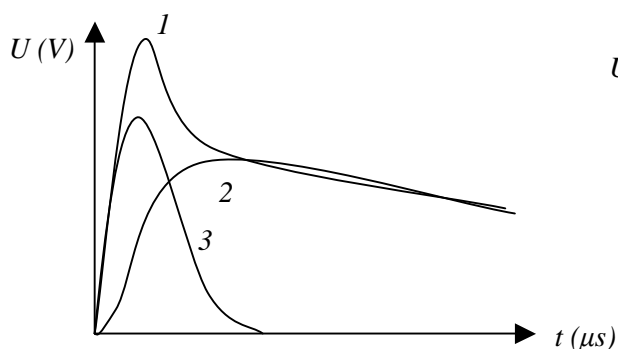
Standardní generátor vytváří nepříjemné oscilace, pomocí kompenzace překmitu může být schopen udržet tvar oscilace v rozmezí 5 %. Pro generaci strmého čela impulsu (hodnota odporu je velmi nízká) je kompenzace překmitu velmi užitečná.

Jak již bylo řečeno, kompenzace překmitu umožňuje zvětšení kapacitního zatížení. To je vhodné pro zkoušení kapacitních zátěží (pro měření na kabelech se používá jiný tvar impulsu). Při zkouškách se strmým čelem vlny je kompenzace překmitu vhodná. Maximální dovolený překmit je 5 %.

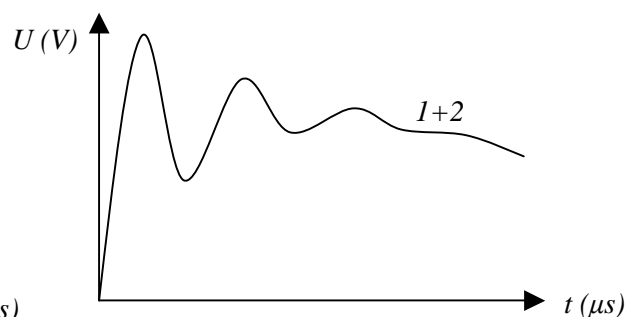
$$\beta = \frac{\text{Překmit}}{U_P} \cdot 100 \leq 5\% \quad (2)$$



Obr. 2.7 Ukázka překmitu



Obr. 2.8 Tvar impulsu s kompenzací překmitu



Tvar impulsu bez kompenzace překmitu

- 1 – Napětí před kompenzací
- 2 – Napětí na zkušebním objektu
- 3 – Napětí po kompenzací

### 2.3.5 Řídicí systémy

Jsou k dispozici dva řídicí systémy, které se liší propracovaností. Technické údaje jsou k dispozici od společnosti Haefely. Dobře zavedený GC 223 a plně elektronický TR-AS 25-8. Oba řídicí systémy pro testování systému SGSA umožňují nastavení plně automatických testovacích sekvencí, které mají být provedeny. Programování řídicího systému je snadné. Ručního režimu je také k dispozici. Datová komunikace mezi ostatními zařízeními společnosti Haefely (impulsní měřicí systém) je plně podporována. Dálkové ovládání z hostitelského počítače je také k dispozici. Řídicí systém může být navržen jako stůl, mini stojan nebo integrovaná verze. Řídicí systémy Haefely fungují na speciálně vyvinutých PCI. Další opatření, jako je optická linka nebo IR komunikace jsou nezbytné. Řídicí jednotka má bezpečnostní okruh a varovnou lampu. Ovládání je v souladu s normou VDE 0104. Uzamykatelné nouzové spínače jsou vestavěné do samostatného boxu. Spínač může být umístěn dle potřeby tak, aby mohl reagovat rychle v případě nouze. Všechny bezpečnostní funkce jsou přímo na kabelovém vstupním jističi, tj. , že neprojdou mikroprocesorovým řídicím systémem [3].

Řídicí systém TR-AS vyrábí firma Dr. Strauss a jede pod operačním systémem Windows NT. TR-AS pracuje s kompatibilní databází DBase, která obsahuje všechny uložené naměřené údaje nebo výsledky hodnocení. Databáze, se kterými umí pracovat jsou: dbf, dbt, mdx. TR-AS aplikace má OLE automatizační službu. Je možné ovládat aplikaci pomocí OLE klient aplikace, která provozuje TR-AS jako dálkové ovládání. Tato technologie může fungovat pouze tehdy, je-li TR-AS registrován jako OLE automatizační server do databáze registru systému Windows 98/NT.

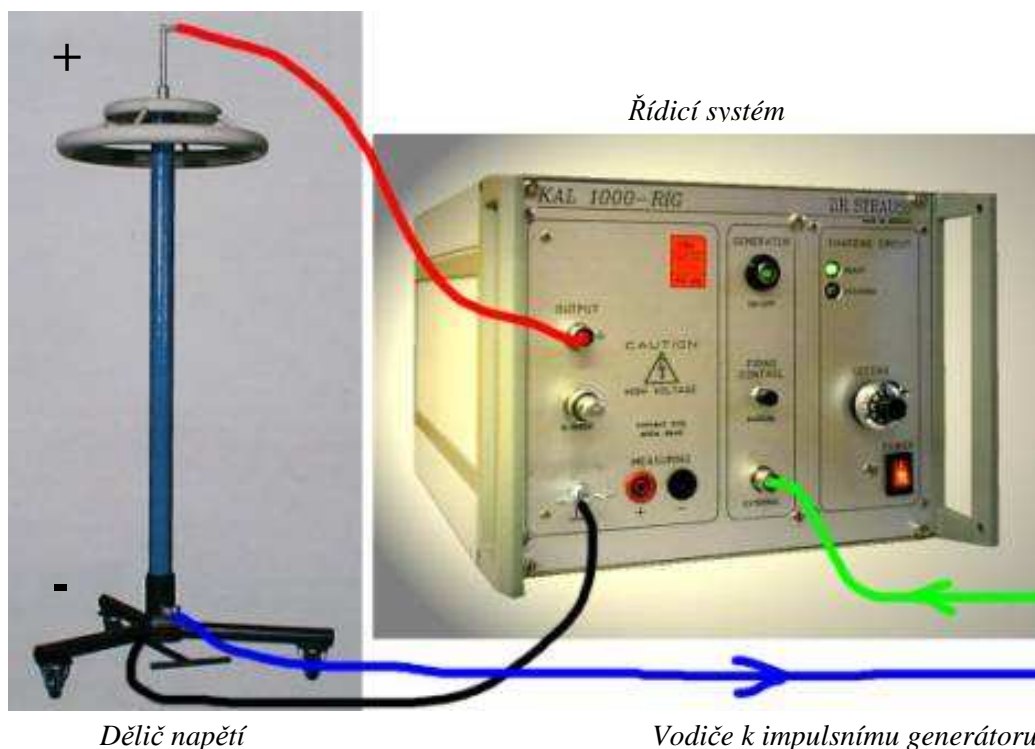
Tento program umí vyhodnocovat parametry zkušebních, atmosférických impulsů. Nezpracovaná data jsou k dispozici v příslušném měřicím kanálu a uložena do databáze nebo do ASCII (soubor pro pozdější dostupnost). Nezpracovaná data jsou vyhlazována rychlostí 200 MS/s v intervalu 20 vzorků a dočasně uložena ve virtuálním kanálu hodnocení. Z padesáti naměřených vzorků se vypočte průměrná hodnota a z největšího vyhlazeného vzorku špičková hodnota. Doba, ve které má impuls 30 % maximálního napětí, se vypočte lineární interpolací v 30 % hodnoty maximální hodnoty z vyhlazených nezpracovaných dat. Doba, ve které dosahuje impuls 90 % maximálního napětí, se vypočte lineární interpolací v 30 % hodnoty maximální hodnoty z vyhlazených nezpracovaných dat. Doba půl týlu kdy má impuls 50 % hodnotu maximálního napětí, se vypočítá jako 50 % hodnoty maximální hodnoty lineární interpolace nezpracovaných dat, zjemněná vyhlazováním v intervalu 10 vzorků.

#### Vlastnosti řídicího systému GC 223

- Pohodlné a flexibilní ovládání impulsního systému.
- Bezpečnostní opatření prováděna v hardwaru, nezávislá na softwaru.
- Manuální a automatický režim k dispozici.
- Digitální měřicí systém (např. Hias 743) lze snadno integrovat.
- Ochrana proti vniknutí prachu.
- Automatická korekce na atmosférické podmínky.
- EMC stíněné a zabezpečené.
- Provedení automatického testu sekvence (volitelně).
- Dálkové ovládání pro všechny funkce (volitelně).

#### Vlastnosti řídicího systému TR-AS 25-8

- Propracované sekvence programu.
- Vybaven VGA barevným monitorem.
- Snadné a jasné označení a grafické zobrazení několika vlastností, jako jsou: cesta úrovní, stav systému, poruchový stav, atd.
- Umožňuje volné programování a ukládání komplexních testovacích cyklů. Libovolný počet zkušebních cyklů může být uložené na disketách.
- Plně automatický režim provozu na zakázku, testovací sekvence s jednotlivými parametry (volitelně).



Obr. 2.9 Připojení řídicího systému k děliči napětí

### 2.3.6 Napájení usměrňovacího obvodu

Nabíjení usměrňovače typu LGR 100 slouží k nabíjení kapacitních prvků a uchovávání energie impulsního generátoru s napětím do 100 kV. To se obvykle nachází v těsné blízkosti základní rámu impulsního generátoru. Připojení je konstruováno hliníkovou trubicí. Transformátor vysokého napětí je izolovaný olejem nebo pryskyřicí, ostatní prvky izoluje okolní vzduch.

Nabíjení usměrňovače tohoto typu je postaveno s kolečky pro větší mobilitu. Standardní nabíjecí usměrňovač typ LGR 100 má jmenovité napětí 100 kV a proud 20 mA nebo 40 mA (typ LGR 100-20 nebo LGR 100-40). Pokud chceme provést zkoušky záporným impulsem, v řídicí jednotce se změní v nastavení polarita a diody se samy automaticky přetočí o 180°.

Hlavní přednosti LGR 100 jsou:

- Kompaktní vzhled.
- Ochrana proti zkratu.
- Standardní automatické řízení motoru přepólováním pro LGR 100-40.
- Možnost automatického řízení motoru přepólováním pro LGR 100-20.

### 2.3.7 Rezistory

Rezistory zabudované do impulsního obvodu jsou drátěné, navinuté na trubku a chráněné smršťovací bužírkou proti mechanickému poškození. Každý odpor má specifickou barvu pro snadnou identifikaci. Tyto odpory mají plug-in pro rychlé připojení a snadnou přestavbu. Externí sériový odpor se skládá z izolační textilní pásky s odporovým drátem navinutým na ní. Díky tomu má vnější rezistor také nízkou indukčnost. Závity na externím sériovém odporu slouží pro vyrovnaní parazitních kapacit. Základní systém obsahuje sadu rezistorů pro tvorbu atmosférických impulsů.

Systém uzemnění je tvořen spínačem namontovaným v základním rámu generátoru a provádí uzemnění generátoru na nejnižší stupeň. Vzhledem k vybíjecí časové konstantě generátoru je dodatečný uzemňovací systém propojen do všech stupňů pro uzemnění kondenzátorů.

Barevné značení rezistorů:

Rezistor	Typ	Barva	Počet	Hodnota
Vybíjecí 1	ZBS	Černý	1	6 kΩ
Vybíjecí 2	ZBS	Černý	1	6 kΩ

<b>Rezistor</b>	<b>Typ</b>	<b>Barva</b>	<b>Počet</b>	<b>Hodnota</b>
Potenciálový	ZBS-POT	Zelený	6	800 k $\Omega$
Nabíjecí	ZBS	Žlutý	6	4,8 k $\Omega$
Sériový	ZBS	Červený	7	12 $\Omega$
Vnější sériový	Band (500, 300, 200)		1	500 $\Omega$
			1	130 $\Omega$
Paralelní	ZBS	Modrý / černý	7	68 $\Omega$

### 2.3.8 Kondenzátory a dělič napětí

#### Kondenzátor

Každý impulsní kondenzátor se skládá z plochých prvků zabudovaných do ocelového pouzdra a napuštěný ricinovým olejem. Pouzdra jsou flexibilní, aby se olej mohl vlivem tlaku roztahovat. Dlouholeté zkušenosti s ricinovým olejem, jsou zárukou dlouhé životnosti kondenzátoru. V každém pouzdře jsou uloženy dva kondenzátory. K dispozici je celkem sedm takových kondenzátorů. Pokud volíme zapojení, kde se využije menší počet kondenzátorů, je potřeba na řídicí jednotce nastavit počet právě zapojených kondenzátorů.

Velikost jednoho kondenzátoru na stupeň je 1  $\mu$ F.

<b>Kondenzátor</b>	<b>Typ</b>	<b>Barva</b>	<b>Počet</b>	<b>Hodnota</b>
Impulsní kondenzátor	CRS5-178NN75S	Modrý	7	2 x 50 kV 2 x 1 $\mu$ F
Výrobní čísla	WO 01401710	č. 377 349 č. 377 365 č. 377 367 č. 377 354 č. 377 348 č. 377 366 č. 377 359		



### Dělič napětí

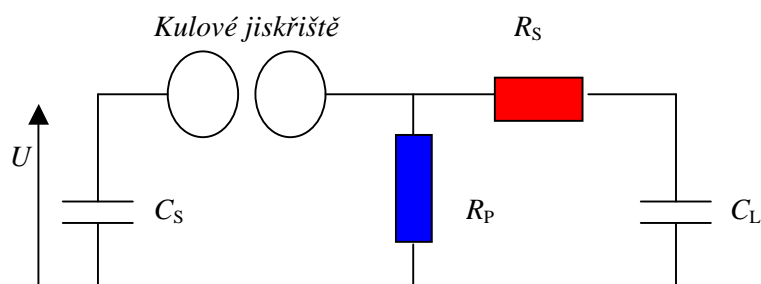
Tlumené kapacitní děliče napětí se používají k měření impulsního vysokého napětí atmosférického a spínacího impulsu. Za předpokladu s přiměřenou další sekundární částí, jej lze také použít pro měření střídavého napětí. Oddělovače typu  $C_s$  lze také použít jako kapacitní zátěž pro impulsní generátor. Tlumící odpor pro dělič typu  $C_s$  je umístěn externě na vrcholu horního kondenzátoru. Tento kapacitní dělič má tvar tyče, na které je umístěn kruh na vrchu a dole podstavec. Mezi nimi jsou vloženy dva kondenzátory o velikosti 500 pF. Tyto kondenzátory připomínají tvarem spíše izolátor.

## 2.4 Matematický model SGSA

Pro výpočet bude použito náhradní schéma impulsního generátoru napětí. V tomto zapojení se kulové jiskřiště chová jako spínač a kondenzátor  $C_s$  jako zdroj napětí. Hodnotu napětí na kondenzátoru  $C_s$  v době přeskočků budeme znát (nastavená hodnota na zdroji napětí). Výpočtem zjistíme, jaké napětí bude na kondenzátoru  $C_L$  v době vzniku přeskočků. Jedná se tedy o sérioparalelní zapojení dvou RC členů. Takové obvody se řeší graficky, početně nebo linearizací.

V našem případě použijme metodu početní.

Schéma pro výpočet:

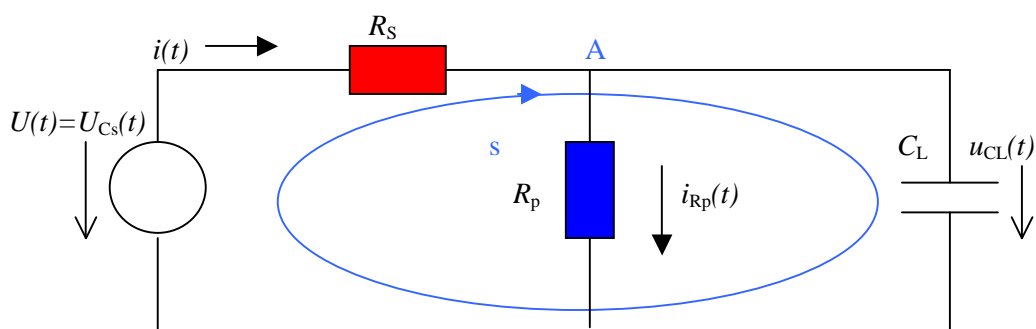


Obr. 2.10 Náhradní schéma zapojení

Stanovení počátečních podmínek (před přeskokem):

$$t(0) : U_{C_s} = \text{Max}, U_{C_L} = 0 \quad (3)$$

Kulové jiskřiště můžeme nahradit pomocí vypínače. Protože v době přeskočků prochází obvodem proud, vypínač je sepnutý a můžeme ho zanedbat. Obvod se nám zjednoduší.



Obr. 2.11 Zjednodušené schéma zapojení

Máme tedy obvod se smyčkou  $s$  a uzlem  $A$ . Podle aplikace druhého Kirchhoffova zákona (algebraický součet napětí ve větvích tvořící libovolnou smyčku je roven nule) dostaneme rovnice:

$$s: u_{C_s} + R_s \cdot C_s \cdot \frac{du_{C_s}}{dt} + u_{C_L} = 0 \quad (4)$$

$$1: -C_s \cdot \frac{du_{C_s}}{dt} + C_L \cdot \frac{du_{C_L}}{dt} + \frac{u_{C_L}}{R_p} = 0 \quad (5)$$

Pomocí matematických úprav dostaneme výslednou rovnici:

$$R_s \cdot R_p \cdot C_s \cdot C_L \cdot \frac{d^2 u_{C_L}}{dt^2} + (R_s \cdot C_s + R_p \cdot C_s + R_p \cdot C_L) \cdot \frac{du_{C_L}}{dt} + u_{C_L} = 0 \quad (6)$$

V novém ustáleném stavu je  $u_{C_b}(\infty) = 0$ . Pro výpočet napětí na kondenzátoru  $C_b$  můžeme psát:

$$u_{C_L}(t) = K_1 \cdot e^{a_1 t} + K_2 \cdot e^{a_2 t} \quad (7)$$

$a_1, a_2$  jsou kořeny kvadratické rovnice ( $a = \frac{du_{C_L}}{dt}$ ), vznikne nám tedy kvadratická rovnice:

$$R_s \cdot R_p \cdot C_s \cdot C_L \cdot a^2 + (R_s \cdot C_s + R_p \cdot C_s + R_p \cdot C_L) \cdot a + 1 = 0 \quad (8)$$

Z této rovnice si vyjádříme  $a_{1,2}$  a dostaneme:

$$a_{1,2} = \frac{-(R_s \cdot C_s + R_p \cdot C_s + R_p \cdot C_L) \pm \sqrt{(R_s \cdot C_s + R_p \cdot C_s + R_p \cdot C_L)^2 - 4 \cdot R_s \cdot R_p \cdot C_s \cdot C_L}}{2 \cdot R_s \cdot R_p \cdot C_s \cdot C_L} \quad (9)$$

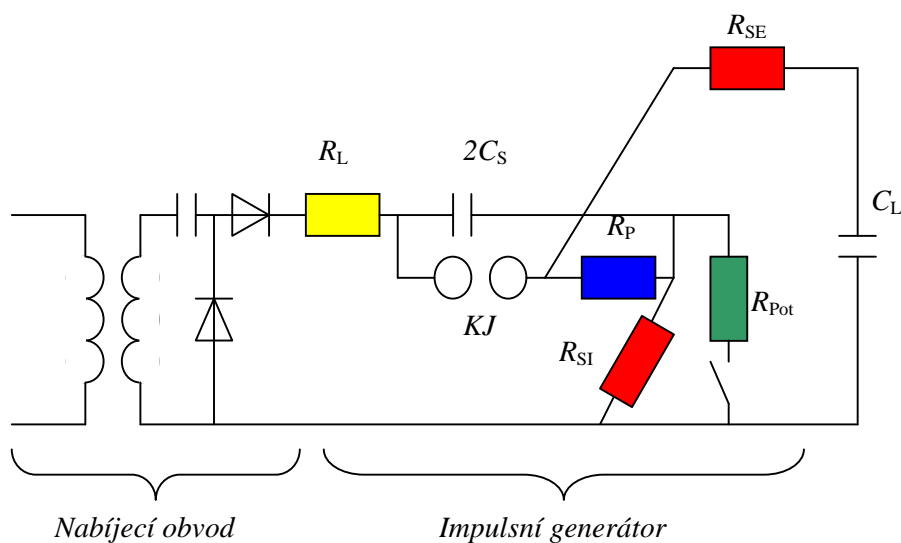
Pokud známe kořeny kvadratické rovnice, vyjádříme si z rovnice (4) napětí  $u_{C_L}$  a dostaneme výslednou rovnici:

$$u_{CL}(t) = U_{Cs} \cdot \frac{R_P \cdot C_s}{\sqrt{(R_S \cdot C_s + R_P \cdot C_s + R_P \cdot C_L)^2 - 4 \cdot R_S \cdot R_P \cdot C_s \cdot C_L}} \cdot (e^{a_1 t} - e^{a_2 t}) \quad (10)$$

Z výsledné rovnice můžeme dopočítat velikost napětí v námi zadaném čase, nebo naopak zjistit v daném čase, jak velké bude napětí. Je tedy možné pomocí rovnice vypočítat dostatečné množství bodů pro zhotovení tvaru napěťové vlny.

## 2.5 Způsoby zapojení impulsního generátoru napětí

Sériově:



Obr. 2.12 Sériové zapojení S1 SGSA

### Legenda

$R_L$	–	nabíjecí rezistor	$R_P$	–	paralelní rezistor
$R_{SI}$	–	vnitřní sériový rezistor	$R_{SE}$	–	vnější sériový rezistor
$R_{Pot}$	–	potenciálový rezistor	$C_S$	–	nabíjecí kondenzátor
$C_L$	–	měřený objekt	KJ	–	kulové jiskřiště

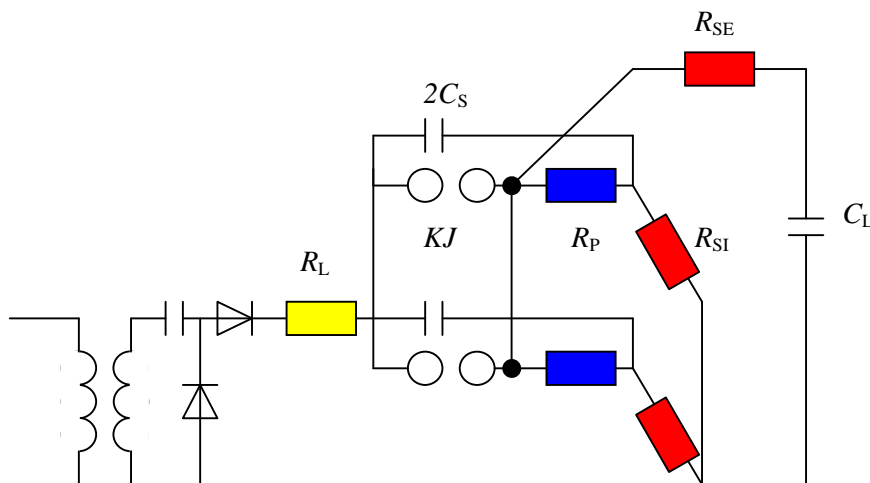
### Sériově S1

$U = 100 \text{ kV}$   
 $R_{si} = 12 \text{ } \Omega$   
 $R_{se} = 500 \text{ } \Omega$   
 $R_p = 68 \text{ } \Omega$   
 $C_s = 1000 \text{ nF}$

Za vnější rezistor  $R_{SE}$  a před měřicí objekt  $C_L$  se zapojuje kapacitní dělič napětí o velikosti  $R_d = 270 \Omega$  a  $C_d = 500 \text{ pF}$ . Vnější rezistor je tvořen páskem a propojuje impulsní generátor s děličem napětí. Kondenzátor  $C_S$  je tvořen dvěma kondenzátory, ale pro zjednodušení náhradního schéma se zakresluje jako jeden. Potenciálové rezistory  $R_{Pot}$  se již v dalších schématech nebudou zakreslovat, ale ve skutečnosti tam jsou. Hodnoty pro ostatní stupně se počítají sérioparalelní kombinací rezistorů a kondenzátorů z hodnot pro 1 stupeň.

Sériové zapojení je nejjednodušší způsob zapojení impulsního generátoru a lze pomocí něj získat nejvyšší zkušební možné napětí o velikosti 700 kV. Díky tomu lze tohle propojení použít pro zkoušení VN a VVN zařízení. Pro svou jednoduchost a přehlednost je nejčastěji používaný způsob propojení jednotlivých stupňů generátoru. Pro zapojení méně než sedmi stupňů (například S4) se musí zbylé nepoužité stupně vyzkratovat bezodporovými svorkami, které jsou součástí příslušenství generátoru.

#### Paralelně:



Obr. 2.13 Paralelní zapojení P2 SGSA

#### Paralelně P2

$$U = 100 \text{ kV}$$

$$R_{Si} = 6 \Omega$$

$$R_{se} = 500 \Omega$$

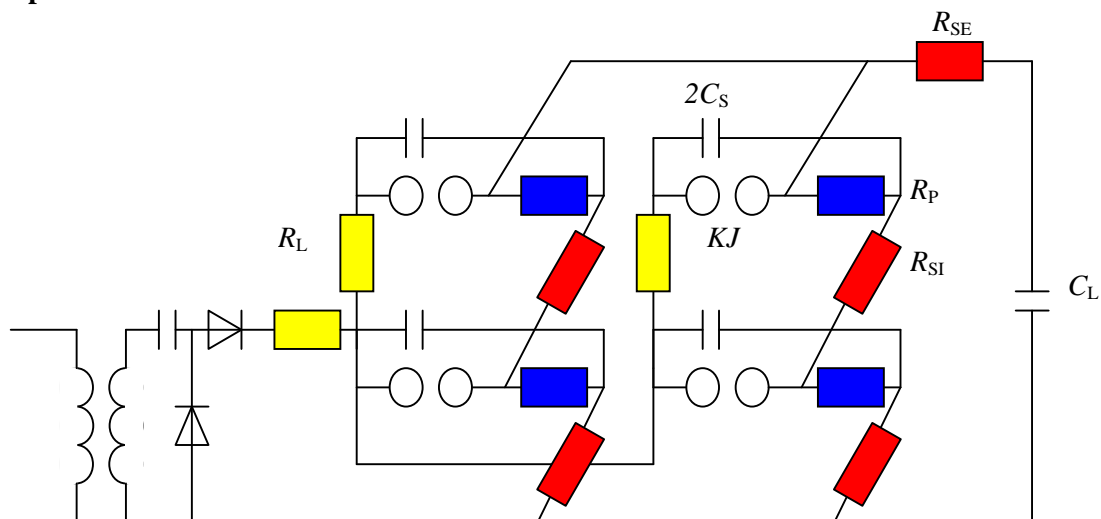
$$R_p = 34 \Omega$$

$$C_s = 2000 \text{ nF}$$

V tomto zapojení bude maximální možné výstupní napětí vždy 100 kV. Tento způsob zapojení se příliš nevyužívá. Výsledná kapacita paralelního zapojení je mnohem větší než v sériovém nebo sérioparalelním zapojení. Protože maximální zkušební napětí je pouze 100 kV, toto

zapojení můžeme použít pouze pro nízkonapěťové zkoušky a zkoušky vysokého napětí na hladině 22 a 35 kV. Výhodou tohoto zapojení je velká energie při nižším napětí.

### Sérioparalelně:



Obr. 2.14 Sérioparalelní zapojení S2P2 SGSA

### Sérioparalelně S2 P2

$$U = 200 \text{ kV}$$

$$R_{si} = 12 \text{ } \Omega$$

$$R_{se} = 500 \text{ } \Omega$$

$$R_p = 68 \text{ } \Omega$$

$$C_s = 1000 \text{ nF}$$

Sérioparalelní kombinace je nejsložitější způsob propojení impulsního generátoru. Na rozdíl od sériového a paralelního zapojení kde lze získat sedm a šest způsobu propojení, jsou v sérioparalelní kombinaci umožněny jen tři způsoby propojení. Maximální možné výstupní napětí je 300 nebo 200 kV, záleží na zvolené variantě zapojení.

Všechny možné způsoby propojení sériové (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7), paralelní (P2, P3, P4, P5, P6, P7) a sérioparalelní (S2 P2, S3 P2, S2 P3) Jsou znázorněny v příloze C. Barevné značení odporů ve schématech, odpovídá skutečnému barevnému značení na impulsním generátoru.

### 3. Návrh laboratorní měřicí úlohy s generátorem SGSA

#### 3.1 Místo měření

Měření se bude provádět v budově L v areálu školy. Tato budova slouží jako laboratoř pro výuku techniky vysokého napětí. Impulsní generátor, dělič napětí a nabíjecí obvod jsou umístěny uvnitř budovy v hale a měřicí prvky jsou v 1. patře budovy ve speciální místnosti. Kromě tohoto zařízení je zde umístěna také laboratoř pro měření osvětlovací techniky.

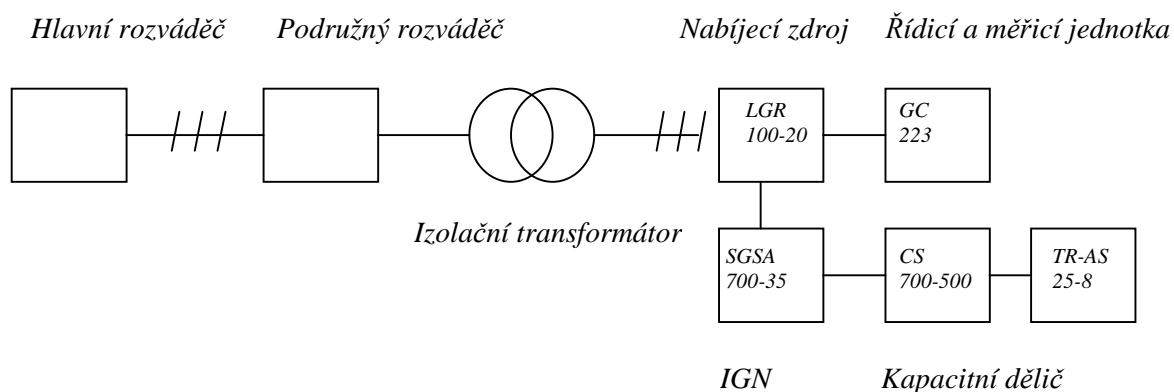
Měření bude probíhat podle normy ČSN IEC 60-1, HD 588.1.S1, 34 5640 pro napětovou hladinu 100 kV (zkouška výdržným napětím při atmosférickém impulsu za sucha). Aby bylo měření co nejpřesnější, tak v prostorách, kde je generátor umístěn, se udržuje čisto. Především výskyt prachu může ovlivnit měření.

Pro změření průběhu napětí použijeme měřicí soustavu TR-AS 258 (8bitový převodník s rychlostí vzorkování 25 MS/s). Tato řídicí jednotka je umístěna o patro výš v řídicí místnosti L 102. Impulsní generátor je nastaven na normalizovaný napětový impuls 1,2/50  $\mu$ s a maximální napětí pro naše měření bude 300 kV.



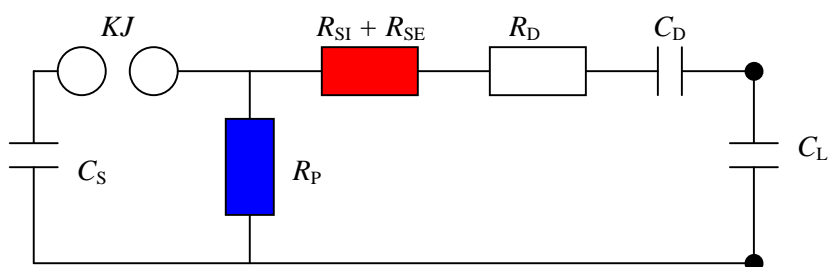
Obr. 3.1 Prostory uvnitř laboratoře

## 3.2 Schéma zapojení



Obr. 3.2 Celkové zapojení pro měření

Náhradní zapojení generátoru:



Obr. 3.3 Náhradní schéma zapojení SGSA

Dělič napětí je stejný pro všechny měření

$R_D = 270 \, \Omega$        $C_D = 500 \, \text{pF}$        $C_L$  – měřený objekt

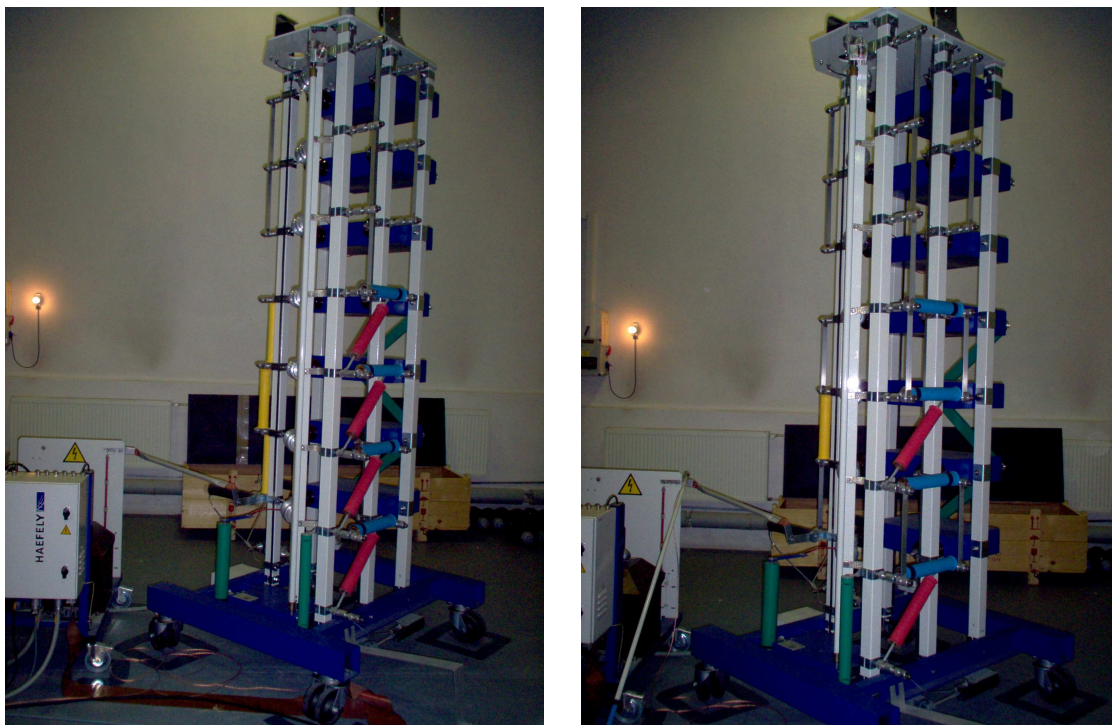
Pro měření použijeme zapojení generátoru S3, S7 a S2P2. Zapojení jsou uvedeny v příloze C.

## 3.3 Seznam použitých přístrojů

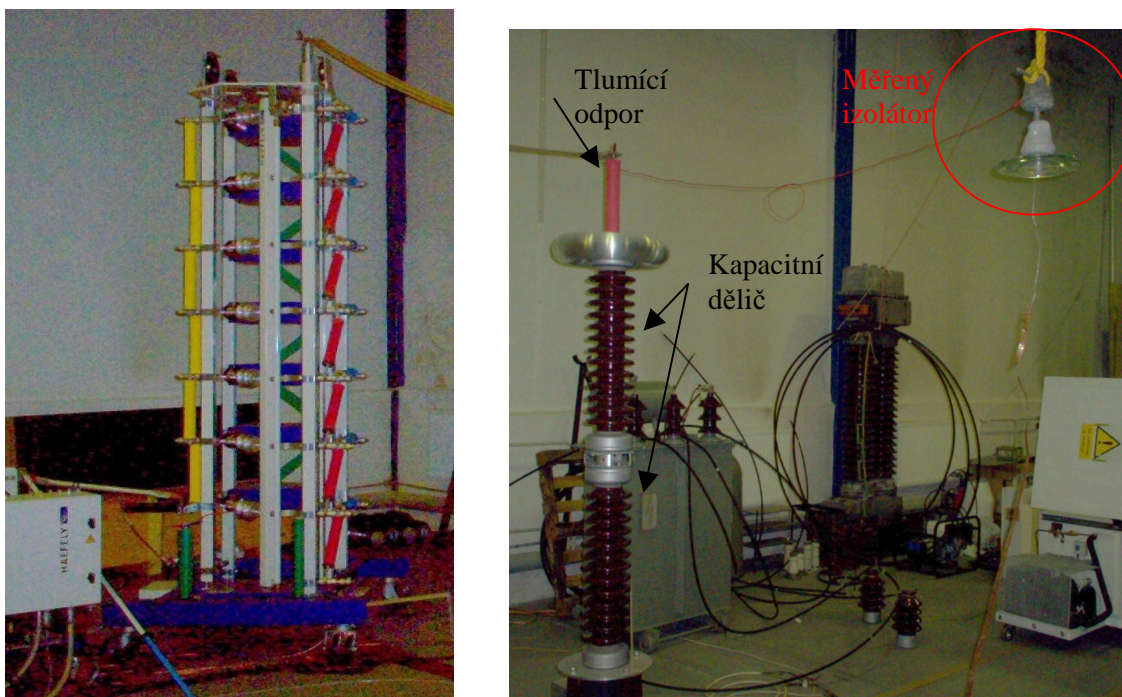
Impulzní generátor napětí	SGSA 700-35	Haefely High Voltage Test
Řídicí jednotka	GC 223	Haefely High Voltage Test
Měřicí systém	TR-AS 25-8	Dr. Strauss System-Elektronik GmbH



### 3.4 Zapojení generátorů pro jednotlivá měření



Obr. 3.4 Zapojení SGSA (vlevo S4, vpravo S2P2)



Obr. 3.5 Zapojení SGSA S7 (vlevo) a měřený objekt (vpravo)



### **3.5 Bezpečnostní pokyny**

Pracoviště impulsního generátoru je vymezeno žlutou barvou. V tomto prostoru se při měření nesmí pohybovat žádné osoby, ani umisťovat žádné předměty. Řídicí systém se nachází na patře v místnosti L 102 a místnost je zajištěna proti neoprávněné manipulaci. Práci s impulsním generátorem napětí upřesňují místní pracovní, provozní a bezpečnostní předpisy. Generátor mohou obsluhovat pouze osoby pro řízení činnosti §7 vyhlášky 50/78 Sb. Na VVN.

Ve zkušebním prostoru budovy L se nachází ještě další zařízení katedry. V průběhu měření na SGSA se nesmí provádět žádné práce na ostatním zařízení a nesmějí se zde pohybovat žádné osoby. Pouze na patře v místnosti L 102 může probíhat výuka, ale nesmí být rušena obsluha generátoru. Výrobce generátoru doporučuje v místnosti s generátorem udržovat čistotu, prach může ovlivnit výsledky měření.

#### **Požární ochrana:**

Ve zkušebně jsou k dispozici 2 ks přenosných sněhových hasicích přístrojů s náplní 5 kg CO<sub>2</sub>. Pokud nejsme schopni požár uhasit, přivoláme hasiče z vrátnice budovy L. Telefonní číslo vrátnice: budova L: 3442, VŠB-TU: 3111. Únikové cesty jsou: hlavní vchod, kde je vrátnice nebo vrata vedoucí přímo do místnosti, kde je umístěn impulsní generátor.

#### **Povinnosti obsluhy:**

- Zkoušky s impulsním generátorem musí provádět vždy minimálně 2 pracovníci,
- před jakoukoliv manipulací musí zkontrolovat bezpečnostní zařízení (Stop tlačítko a dveřní kontakt, výstražná světla a houkačka).
- provede se vizuální kontrola zařízení,
- všechny zapojené i nezapojené kondenzátory musí být zkratovány nebo uzemněny a zkontroluje se pospojování a připojení na zemnicí soustavu.
- než se začne měřit, provede se zápis do deníku o kontrolách.

#### **Místní pracovní, provozní a bezpečnostní předpisy:**

Provádění zkoušek ve zkušebně se posuzuje ve smyslu čl. 76 odst.c ČSN 34 3100: Obsluha a práce na elektrických zařízeních, za často se opakující práce, proto není potřeba vydávat příkaz B. Ten nahrazují předpisy normy ČSN 33 1345. Vstup na zkušební pracoviště je označen bezpečnostními tabulkami (Zkušební pracoviště, Vysoké napětí – Životu nebezpečno!, Nevstupuj! a První pomoc).

Po dokončení měření se do deníku provedených měření zapíše datum, kdy bylo měření provedeno.

#### **Pro práci ve zkušebním prostoru platí:**

- Se zkušebním zařízením mohou pracovat pouze osoby znalé nebo poučené. Veškerá obsluha musí být poučena o bezpečnosti práce.
- Všichni pracovníci ve zkušebně mohou pracovat pouze pod dohledem vedoucího.

- Vstup na pracoviště cizím osobám je povolen pouze v doprovodu osoby znalé se souhlasem vedoucího.
- Ve zkušebním prostoru vysokého napětí se nesmí provádět jiné činnosti při provádění zkoušek.
- Ve zkušebním prostoru se musí dodržovat bezpečnostní opatření:
- Veškerá obsluha musí mít přiléhavý pracovní oděv.
- Každý pracovník musí mít znalosti o poskytování první pomoci při úrazu elektrickým proudem.
- Pokud si pracovník je vědom, že zadaná práce vedoucím je nad jeho schopnosti, musí to včas oznámit vedoucímu.
- V době zkoušení nesmí být pracovníci rušeni.
- Pokud provádí zkoušky, jejichž postup není stanoven normou, je třeba se před měřením dohodnout na postupu.
- Po skončení zkoušky se musí impulsní generátor vybit a uzemnit.

### **3.6 Uvedení generátoru do provozu**

1. Zapnutím hlavního vypínače se připojí napětí na oddělovací transformátor impulsního generátoru napětí.
2. Po odstranění zemnicí tyče z nabíjecího zdroje opustí všechny osoby prostor zkušebního pracoviště dveřmi do spojovací chodby, vrata budou uzamčena a klíč zůstane v zámku zevnitř.
3. Po uzavření dveří do spojovací chodby a odemčení Emergency se zapne síťový vypínač řídicí jednotky GC 223. Během aktivace svítí červené výstražné světlo a po dokončení zelené výstražné světlo (odvine se uzemňovací pásek kondenzátorů impulsního generátoru).
4. Nastavíme patřičné parametry na impulsním generátoru a stisknutím tlačítka READY se odpojí uzemnění nabíjecího zdroje a rozsvítí se výstražné červené světlo.
5. Stiskem tlačítka HV-On se začne nabíjet impulsní generátor (pokud tlačítko HV-On nestiskneme do 10 sekund od stisknutí tlačítka READY, dojde k uzemnění nabíjecího zdroje). Nabíjení můžeme kdykoliv přerušit tlačítkem HV-OFF.
6. Jakmile se generátor nabije na naši nastavenou hodnotu, zazní akustický signál houkačky a měřicí systém TR-AS 25-8 zaznamená data.
7. Před prováděním dalších manipulací ve zkušebním prostoru je nejprve nutné vypnout impulsní generátor tlačítkem Emergency. Provede se automatické uzemnění kondenzátorů a my musíme dát na nabíjecí zdroj zemnicí tyč před vstupem na pracoviště.
8. Pokud se během měření otevrou dveře, systém se automaticky vypne.

Vypnutí celého zařízení po měření provedeme uzamčením Emergency, pak se vypne řídicí jednotka a měřicí systém a nakonec hlavní vypínač.

### 3.7 Teoretický rozbor

Před měřením je nutno zkontrolovat pracoviště a funkci bezpečnostního zařízení. Měření smí provádět minimálně dva pracovníci pro řízení činnosti podle paragrafu 7 vyhlášky 50/75Sb. Měření se provede na skleněném izolátoru ruské výroby typu IEC 305.

Zkušební metoda se bude provádět podle metody typu D, normy ČSN IEC 60-1: Technika zkoušek vysokým napětím. Bude se měřit na skleněném izolátoru ruské výroby určený pro zavěšení. Přeskok se uzavře přes povrch měřeného objektu ve vzduchu. Vzduch se řadí do skupiny obnovující se izolace. Nedojde tedy ke zničení měřeného prvku, ale jen k opálení jeho povrchu. Proto je nutno po každém přeskoku prvek očistit od spálenin. Pokud nedojde k přeskoku na objektu, doba mezi jednotlivými impulsy může být mnohem menší, než udává výrobce generátoru. Tato klidová doba je pro vychladnutí paralelních rezistorů, které se zahřáli, vlivem průchodu velkého proudu při vzniklém přeskoku.

Izolátor je určen pro zavěšení na stožáry VN a v propojení s více kusy stejného typu, je vhodný i pro hladiny VVN a ZVN. Jeden talíř vydrží napětí 100 kV. Na izolátor přivedeme napětí atmosférického impulsu  $1,2/50 \mu s$  o určité hodnotě napětí (bude použito celkem 5 různých hladin) a pokud dojde ke vzniku výboje, měřící jednotka zaznamená dobu useknutí impulsu. Pro každou nastavenou hodnotu napětí měření opakujeme 10krát a ze změřených hodnot, vytvoříme průměrnou hodnotu doby useknutí (pokud dojde k přeskoku jen ve třech případech z deseti bude výsledný čas přeskoku spočten jako průměr tří hodnot, pokud dojde k přeskoku sedmkrát bude čas určen průměrem sedmi hodnot). Podle času, ve kterém vznikl přeskok, vyhodnotíme, zda došlo k přeskoku v týlu nebo v čele vlny. Z největší pravděpodobností dojde při nižších napětích k přeskoku v týlu vlny a při nejvyšších hodnotách už v čele vlny. Přeskok v čele vlny způsobuje velká intenzita elektrického pole, která je schopna vytvořit vodivý kanál za menší čas než intenzita elektrického pole při nižších napětích. Pro měření bude použito zapojení S4, S7 a S2P2 impulsního generátoru, to znamená, že nejvyšší možné zkušební napětí bude 400 kV a v případě zapojení S7 700kV. Pro naše měření postačí nejvyšší napětí 145 kV.



Obr. 3.6 Skleněný izolátor IEC 305

**Tab. 3.1 Technické parametry izolátoru**

<b>Výrobce</b>	<b>JSC “YuAIZ”</b>		<b>LIC.Ltd</b>	
<b>Typ</b>	<b>IEC 305</b>	<b>U 120B</b>	<b>U 120G</b>	<b>U 120B</b>
	<b>GOST 27661</b>	<b>Tr 120B</b>	<b>Tr 120G</b>	<b>Tr 120B</b>
Bez mechanického zatížení	kN	120	120	120
Mechanická pevnost	kN	96	96	96
Průměr izolační části	mm	255	255	255
Rozteč	mm	127	146	146/170
Nominální povrchové vzdálenosti	mm	320	320	320
Koule a spojovací zástrčka	mm	16	16	16
Průrazné napětí izolátoru	kV	130	130	130
50 Hz výdržné napětí (suché)	kV	70	70	75
výdržné napětí 1.2/50 + / - (suchý atmosférický impuls) jedné jednotky	kV	100/100	100/100	100/100
Rádiového rušení napětí na 0,5 MHz	dB	60	60	60
	kV	20	20	20
	dB	86	86	86
	kV	30	30	30
Váha	kg	3,9	3,9	3,9

### **3.8 Postup měření**

1. Měření bude provedeno v rozsahu 125 až 150 kV, napětí se bude zvyšovat po 5 kV.
2. Měření budeme opakovat 10krát pro jednu napěťovou hladinu. Použijeme celkem 5 napěťových hladin. Pokud dojde k přeskoku, měřicí jednotka zaznamená dobu useknutí a velikost napětí (pro přeskok v týlu impulsu se bere amplituda impulsu).
3. Výrobce udává, že skutečné napětí bude o 3 % nižší než nastavené a přibližně 2 kV se ztratí ve vnějším sériovém rezistoru. Pokud tedy nastavíme na generátoru

hodnotu 130 kV, výsledné napětí je o přibližně 5 kV nižší. Na měřený objekt tedy přiložíme 125 kV.

4. Všechny naměřené hodnoty zaznamenáme do přehledných tabulek.
5. Z naměřených hodnot vytvoříme grafy závislosti přeskokového napětí na jednotlivých hladinách napětí a vyhodnotíme  $U_{50}$ ).
6. Nakonec zhodnotíme celé měření

### 3.9 Vzorová tabulka pro měření

Tab. 3.2 Vzorová tabulka

Měření číslo:	$U_p$ (kV) a $T_{usek}$ ( $\mu s$ )									
	125	$T_{usek}$	130	$T_{usek}$	135	$T_{usek}$	140	$T_{usek}$	145	$T_{usek}$
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

### 3.10 Výpočty parametrů pro zapojení SGSA

Hodnoty rezistorů a kondenzátorů, pro různé typy propojení impulsního generátoru, potřebujeme znát při matematických výpočtech nebo modelování v programech. V programu ATP byly vytvořeny veškeré možné kombinace propojení.

Při výpočtu se sčítají sériově nebo paralelně jednotlivé sériové rezistory, paralelní rezistory a kondenzátory podle způsobu propojení. Níže je uveden postup výpočtu pro zapojení S7 a tabulka, ve které jsou uvedeny výsledné hodnoty pro ostatní zapojení.

Vycházíme s hodnot pro zapojení S1.

$$R_{si} = 12 \, \Omega, R_p = 68 \, \Omega, C_s = 1000 \, nF, R_{se} = 500 \, \Omega \text{ (} R_{se} \text{ se nemění)}$$

Pro zapojení S7 se sečtou hodnoty paralelních a sériových odporů sedmkrát. V případě kondenzátoru se jedná o sčítání paralelní. Výsledná kapacita bude tedy sedmkrát menší.

$$R_{si} = 7 \cdot R_{si} = 7 \cdot 12 = 84 \Omega \quad (11)$$

$$R_p = 7 \cdot R_p = 7 \cdot 68 = 476 \Omega \quad (12)$$

$$C_s = \frac{1}{7} \cdot C_s = \frac{1}{7} \cdot 1000 = 143 \mu F \quad (13)$$

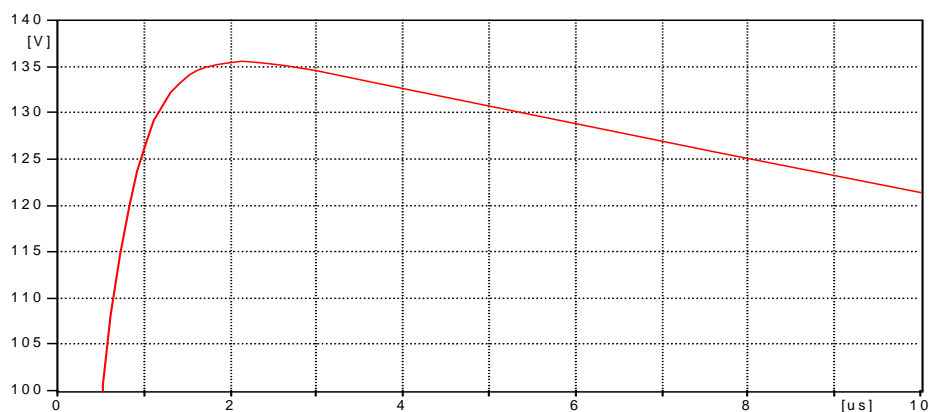
Pro výpočty v ATP se ještě k sériovému rezistoru  $R_{si}$  ještě přičte vnější sériový rezistor  $R_{se}$ .

**Tab. 3.3 Vypočtené hodnoty pro všechna zapojení SGSA**

	Sériově						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
$R_{SI} (\Omega)$	12	24	36	48	60	72	84
$R_P (\Omega)$	68	136	204	272	340	408	476
$C_S (nF)$	1000	500	333	250	200	166,7	143
	Paralelně						
	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
$R_{SI} (\Omega)$	6	4	3	2,4	2	1,7	
$R_P (\Omega)$	34	22,7	17	13,6	11,3	9,7	
$C_S (nF)$	2000	3000	4000	5000	6000	7000	
	Sérioparalelně						
	S2P2	S2P3	S3P3				
$R_{SI} (\Omega)$	12	18	8				
$R_P (\Omega)$	68	102	45,3				
$C_S (nF)$	1000	670	1500				

### 3.11 Namodelovaný atmosférický impuls v programu ATP

V programu ATP Draw byl vytvořen model atmosférického impulsu. Pro čtyřstupňové zapojení S4 o nastaveném napětí 140 kV, nám program ATP vyhodnotil tvar napěťové vlny takto:



**Obr. 3.7 Model atmosférického impulsu 1,2/50  $\mu s$  v zapojení S4**

## 4. Měření a zpracování zkušebního protokolu

<b>Zkoušený předmět:</b>	Skleněný závěsný izolátor
<b>Typ:</b>	IEC 305
<b>Hodnota výdržného napětí:</b>	110 kV
<b>Výrobce:</b>	Global Insulator group
<b>Provedené zkoušky:</b>	Zkouška výdržného napětí Měření přeskokového napětí
<b>Specifikace zkoušek:</b>	ČSN IEC 60-1: Technika zkoušek vysokým napětím
<b>Výsledek zkoušek:</b>	Skleněný závěsný izolátor typu IEC 305 vyhověl zkoušce výdržným napětím podle normy ČSN IEC 60-1: Technika zkoušek vysokým napětím.
<b>Datum zkoušek:</b>	3.2.2010 17.3.2010

### 4.1 Měření v zapojení S7

Na skleněném závěsném izolátoru typu IEC 305 byly provedeny následující zkoušky:

1. Zkouška atmosférickým impulsem 1,2/50  $\mu$ s ČSN IEC 60-1

**Datum měření:** 3.2.2010

**Atmosférické podmínky při měření:**

Teplota	21 °C
Tlak	101,3 kPa
Vlhkost	31 %

Zkoušky a měření bylo provedeno v laboratoři vysokého napětí areálu školy VŠB-TU Ostrava v budově L.

Použité přístroje pro měření:

Impulzní generátor napětí	SGSA 700-35	Haefely High Voltage Test
Řídicí jednotka	GC 223	Haefely High Voltage Test
Měřicí systém	TR-AS 25-8	Dr. Strauss System-Elektronik GmbH

**Tab. 4.1 Metoda více hladin S7**

Měření číslo:	U <sub>P</sub> (kV) a T <sub>usek</sub> (μs)									
	130	T <sub>usek</sub>	135	T <sub>usek</sub>	140	T <sub>usek</sub>	145	T <sub>usek</sub>	150	T <sub>usek</sub>
1	124	-	129	6,31	133	6,68	139	4,38	135	2,00
2	124	-	130	-	135	-	134	2,37	140	2,05
3	125	-	131	-	135	-	138	2,74	143	2,77
4	123	-	129	-	135	-	137	2,14	141	2,16
5	126	-	131	-	135	-	137	2,44	140	2,13
6	124	4,70	131	-	134	-	137	2,40	141	2,29
7	124	-	132	-	135	-	137	2,31	140	2,14
8	125	-	132	-	135	-	132	2,05	143	2,34
9	126	-	129	-	134	-	134	2,15	135	1,85
10	125	-	129	-	135	-	132	2,10	140	1,97

U tohoto měření bylo použito více časů pro nabíjení kondenzátorů. Doba nabíjení pro napětí 125 až 135 kV byla nastavena na 15 s, pro napětí 140 kV jsme zvolili 20 s a pro napětí 145 a 150 byla nabíjecí doba 10 s. Skutečné napětí bylo vždy nižší, než nastavené v toleranci 3 % a ztráty v  $R_{se}$ .

<u>Zkušební napětí</u>	<u>Počet impulsů</u>	<u>Počet přeskoků</u>
+125 kV	10	1
+130 kV	10	1
+135 kV	10	1
+140 kV	10	10
+145 kV	10	10

**Tab. 4.2 Metoda nahoru-dolu S7**

U (kV)	U <sub>P</sub> (kV)	Čas (μs)
100	97	-
120	116	-
140	131	3,11
130	125	3,41
120	116	6,7
110	107	-
115	112	-
120	116	-
125	121	-
130	126,3	5,92
128	123,4	4,39
126	122	-
127	123,4	5,16



Při nastaveném nabíjecím čase 10 s docházelo k přeskokům daleko častěji a už při nižších napěťových hladinách než při vyšších nabíjecích časech.

## 4.2 Měření v zapojení S2P2

Na skleněném závěsném izolátoru typu IEC 305 byly provedeny následující zkoušky:

1. Zkouška atmosférickým impulsem 1,2/50  $\mu$ s ČSN IEC 60-1

**Datum měření:** 17.3.2010

**Atmosférické podmínky při měření:**

Teplota	20 °C
Tlak	102,3 kPa
Vlhkost	39 %

Zkoušky a měření bylo provedeno v laboratoři vysokého napětí areálu školy VŠB-TU Ostrava v budově L.

**Použité přístroje pro měření:**

Impulzní generátor napětí	SGSA 700-35	Haefely High Voltage Test
Řídicí jednotka	GC 223	Haefely High Voltage Test
Měřicí systém	TR-AS 25-8	Dr. Strauss System-Elektronik GmbH

**Tab. 4.3 Metoda více hladin S2P2**

Měření číslo:	U <sub>P</sub> (kV) a T <sub>usek</sub> ( $\mu$ s)									
	125	T <sub>usek</sub>	130	T <sub>usek</sub>	135	T <sub>usek</sub>	140	T <sub>usek</sub>	145	T <sub>usek</sub>
1	120*	-	123	-	129	-	133	4,42	132	2,10
2	119*	-	123	-	129	-	135	4,86	134	3,62
3	118*	-	124	-	130	-	132	4,84	134	2,40
4	120*	-	124	-	129	-	134	2,66	134	2,40
5	120*	-	123	-	129	-	135	2,86	133	2,34
6	120	-	125	-	129	-	128	2,14	137	2,20
7	120	-	126	-	129	-	129	2,62	132	2,03
8	118	-	125	-	130	-	130	3,50	132	2,33
9	120	-	125	-	129	-	134	3,37	133	2,20
10	120	-	126	-	129	-	130	2,78	134	2,43

U tohoto měření byl čas nabíjení kondenzátoru 32 s při 125 kV, a 34s při 145 kV. Nastavení doby nabíjení řídila automatika. Skutečné napětí bylo vždy nižší, než nastavené v toleranci 3 % a ztráty v  $R_{se}$ .

<u>Zkušební napětí</u>	<u>Počet impulsů</u>	<u>Počet přeskoků</u>
+120 kV	10	0
+125 kV	10	0
+130 kV	10	0
+135 kV	10	10
+140 kV	10	10

Pozn.: Při zapojování generátoru došlo k chybě. V generátoru byly zapojeny tři nabíjecí rezistory místo jednoho. Chyba byla zjištěná při pěti odměřených hodnotách a odstraněna. Protože však po opravení nedošlo na této hladině napětí k přeskoku, nebylo nutné měření opakovat. Hodnoty naměřené při chybném zapojení jsou označeny hvězdičkou.

### 4.3 Měření v zapojení S4

Na skleněném závěsném izolátoru typu IEC 305 byly provedeny následující zkoušky:

1. Zkouška atmosférickým impulsem 1,2/50  $\mu$ s ČSN IEC 60-1

**Datum měření:** 17.3.2010

**Atmosférické podmínky při měření:**

Teplota	21 °C
Tlak	102,3 kPa
Vlhkost	38 %

Zkoušky a měření bylo provedeno v laboratoři vysokého napětí areálu školy VŠB-TU Ostrava v budově L.

**Použité přístroje pro měření:**

Impulzní generátor napětí	SGSA 700-35	Haefely High Voltage Test
Řídicí jednotka	GC 223	Haefely High Voltage Test
Měřicí systém	TR-AS 25-8	Dr. Strauss System-Elektronik GmbH

**Tab. 4.4 Metoda více hladin S4**

Měření číslo:	U (kV) a T <sub>usek</sub> ( $\mu$ s)											
	125	T <sub>usek</sub>	130	T <sub>usek</sub>	135	T <sub>usek</sub>	140	T <sub>usek</sub>	145	T <sub>usek</sub>	150	T <sub>usek</sub>
<b>1</b>	120	4,03	124	-	127	3,30	134	3,56	134	2,55	140	1,86
<b>2</b>	118	5,00	124	6,86	131	3,10	129	2,26	133	2,32	137	2,16
<b>3</b>	120	7,20	123	4,51	129	3,23	129	2,42	133	2,29	141	2,15
<b>4</b>	120	-	122	3,80	126	3,10	130	2,68	132	2,36	143	2,16
<b>5</b>	118	4,80	125	4,14	130	4,20	130	2,54	133	2,42	136	2,03
<b>6</b>	120	5,30	122	4,10	126	3,10	130	2,81	138	3,01	141	2,56

Měření číslo:	U (kV) a T <sub>usek</sub> (μs)											
	125	T <sub>usek</sub>	130	T <sub>usek</sub>	135	T <sub>usek</sub>	140	T <sub>usek</sub>	145	T <sub>usek</sub>	150	T <sub>usek</sub>
7	117	5,10	123	4,20	126	2,90	129	2,37	133	2,26	141	2,3
8	120	-	125	5,30	126	3,14	130	2,89	134	2,45	141	2,15
9	121	-	122	4,54	125	2,70	130	2,92	138	2,27	135	1,98
10	121	-	125	3,70	125	2,88	132	2,38	133	2,25	141	2,2

U tohoto měření se pohyboval čas nabíjení kondenzátoru od 34 s při 125 kV, až na hodnotu 36 s při 150 kV. Generátor opět automaticky navyšoval dobu nabíjení, při zvětšujícím se, nastaveném napětí. Skutečné napětí bylo vždy nižší, než nastavené v toleranci 3 % a ztráty v  $R_{se}$ .

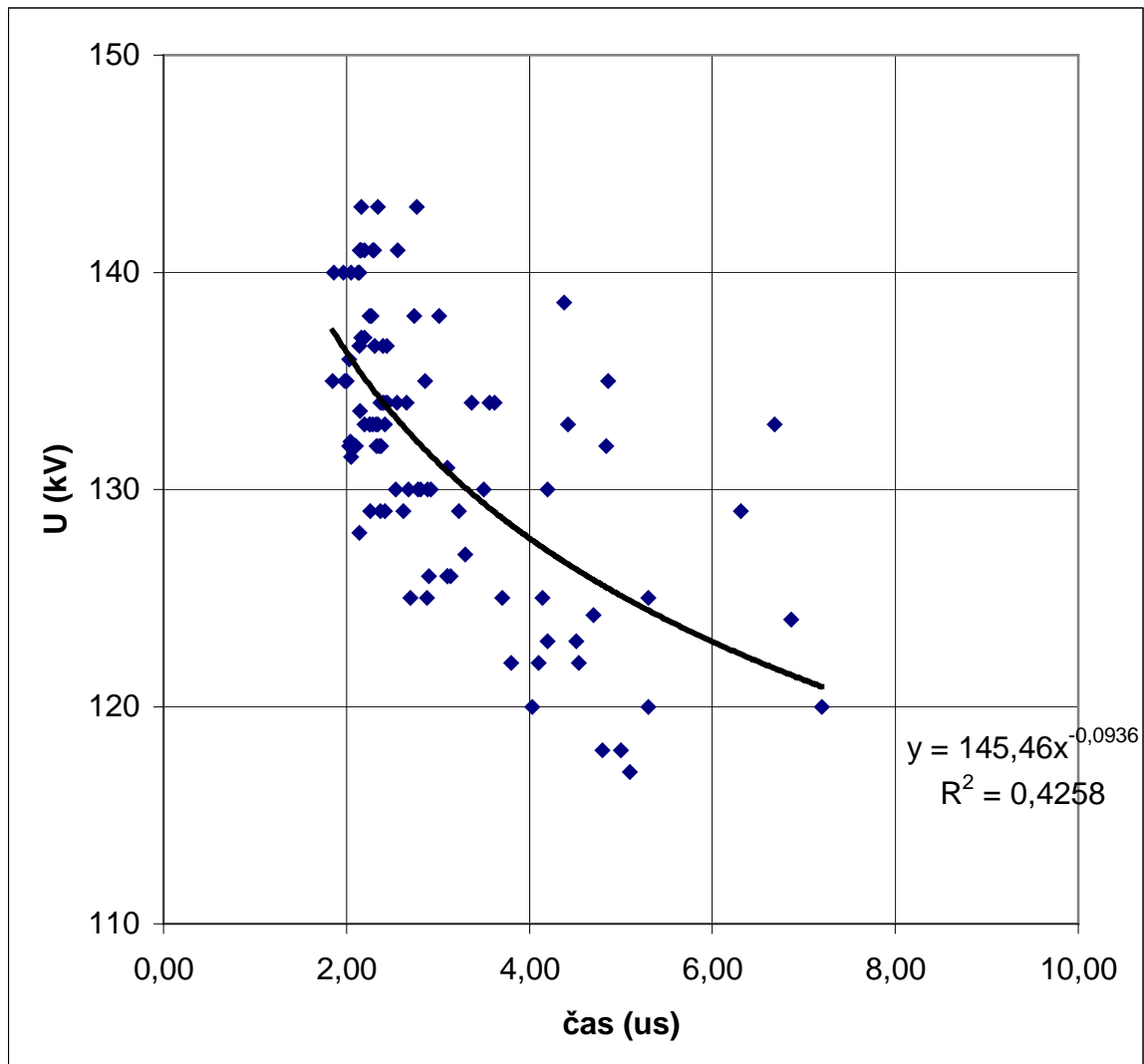
<u>Zkušební napětí</u>	<u>Počet impulsů</u>	<u>Počet přeskoků</u>
+120 kV	10	6
+125 kV	10	9
+130 kV	10	10
+135 kV	10	10
+140 kV	10	10
+145 kV	10	10

Pro vynesení grafu k určení polovinového přeskokového napětí, použijeme hodnoty ze všech tabulek. Pro vyhodnocení bereme pouze hladiny napětí, kde došlo alespoň k 1 až 9 přeskokům. Hladiny napětí, na kterých nedošlo ani jednou k přeskoku, nebo došlo k přeskoku pokaždé, se do pravděpodobnostního papíru nevynáší.

Graf bude vynesena z těchto napěťových hladin:

<u>Zkušební napětí</u>	<u>Počet impulsů</u>	<u>Počet přeskoků</u>	<u>Četnost</u>
+120 kV	12	3	25 %
+123 kV	6	2	33 %
+125 kV	11	5	45 %
+126 kV	8	4	50 %
+130 kV	11	8	72 %
+132 kV	10	8	80 %

#### 4.4 Grafy



Obr. 4.1 Závislost přeskovového napětí na čase

#### 4.5 Vyhodnocení polovinového přeskovového napětí

Výpočet odchylky:

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru

$$\delta = U_{P84} - U_{P50} \quad (14)$$

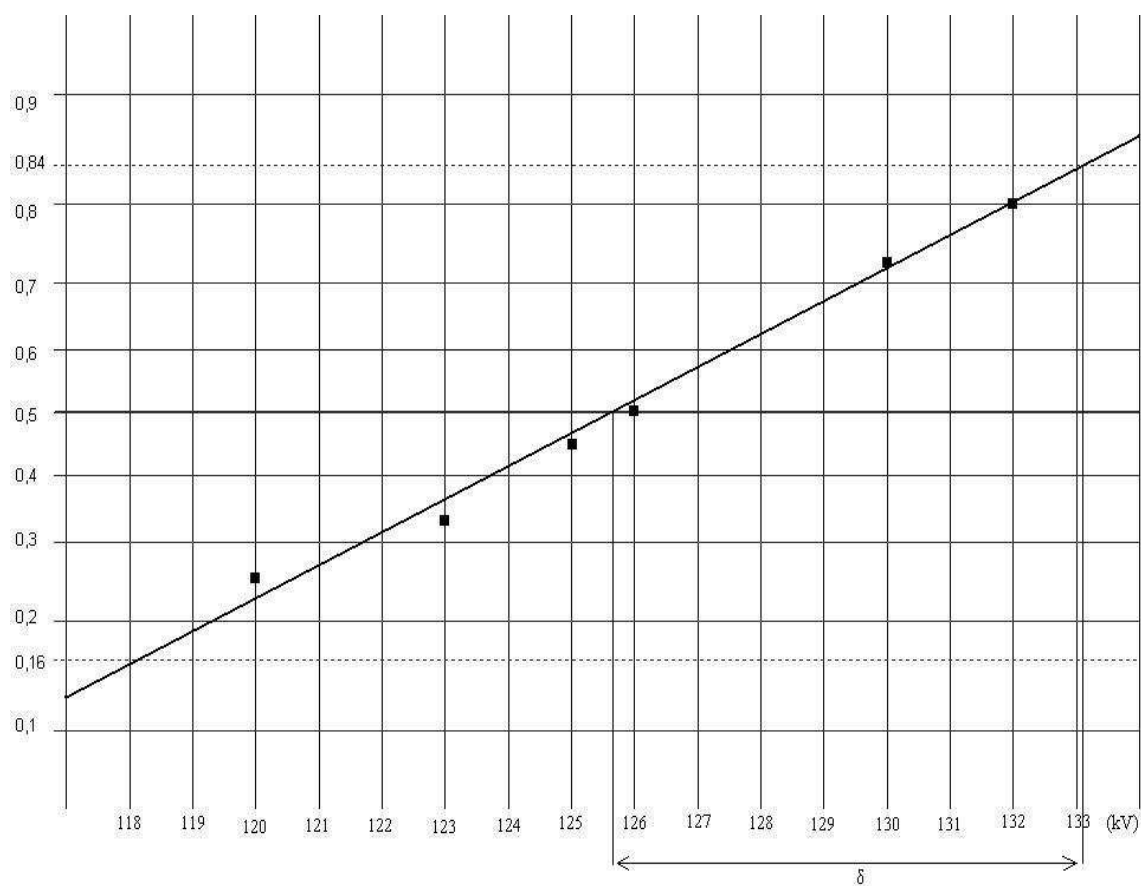
Pravděpodobná chyba aritmetického průměru

$$\Delta\delta = \frac{2}{3} \cdot \delta \quad (15)$$

Výpočty z grafu na obr. 4.5

$$\delta = 133,1 - 125,7 = 7,4 \text{ kV} \quad (16)$$

$$\Delta\delta = \frac{2}{3} \cdot 7,4 = 4,9 \text{ kV} \quad (17)$$



**Obr. 4.5 Vyhodnocení polovinového napětí  $U_{50}$**

Polovinové napětí odečtené z grafu je 125,7 kV. Na grafu je to ta hodnota, ve které protíná přímka osu s označením 0,5.

## 4.6 Zhodnocení

Provedlo se měření přeskokového napětí na skleněném izolátoru čtyřmi metodami. První dvě metody měření byly v uspořádání S7 generátoru a další dvě metody v uspořádání S4 a S2P2. Z výsledných hodnot bylo určeno polovinové přeskokové napětí, to je napětí, při kterém je pravděpodobnost, že vznikne přeskok stejná, jako že nevznikne.

První měření bylo provedeno metodou nahoru-dolu v zapojení generátoru S7. Nejprve se zvyšovalo napětí, dokud nedošlo k přeskoku po 20-ti kV a při přeskoku se snížilo o poloviční hodnotu, tedy 10 kV. Pokud po tomto snížení nedojde k přeskoku, napětí se opět zvýší o poloviční hodnotu. Zvyšováním a následným snižováním napětí, se pokračuje tak dlouho, dokud nenajdeme tu správnou hladinu napětí, kdy dochází k přeskoku pravidelně. Podle této metody dochází k přeskoku při napětí 123,4 kV.

Druhé měření bylo provedeno metodou více hladin v zapojení generátoru S7. Podle této metody se nastavila jedna hladina napětí a na měřený objekt bylo přivedeno deset impulsů této napěťové hladiny. Bylo zvoleno pět napěťových hladin od 130 do 150 kV po 5 kV. U této metody došlo k jednomu přeskoku z deseti hodnot při 124 kV. K pravidelnému přeskoku docházelo od 138 kV.

Třetí měření bylo provedeno taktéž metodou více hladin, ale tentokrát byl generátor zapojen do sérioparalelní kombinace S2P2. Na izolátor bylo přivedeno pět napěťových hladin o deseti impulsech na hladinu. Při tomto měření byla způsobena konstrukční chyba zapojení generátoru, která byla ovšem během několika odměřených hodnot objevena a opravena. V tomto zapojení docházelo k přeskoku až při hodnotách 130 kV.

Čtvrté měření bylo provedeno taky metodou více hladin, ale tentokrát byl generátor zapojen v zapojení S4. Na izolátor bylo přivedeno pět napěťových hladin o deseti impulsech na hladinu. Při tomto zapojení docházelo k přeskoku už při 120 kV.

Ze změřených hodnot byl vynesena graf srovnávající všechny měření metodou více hladin. Také bylo graficky určeno polovinové přeskokové napětí  $U_{50}$  ze všech provedených měření a určena pravděpodobná chyba kvadratického průměru. Hodnota polovinového přeskokového napětí vyšla 125,7 kV a pravděpodobná chyba 4,9 kV.

Ze všech provedených měření docházelo k přeskoku až po 120 kV. Výrobce uvádí hodnotu atmosférického impulsu 1,2/50  $\mu$ s, kterou snese 100 kV. Skleněný izolátor vyhověl zkoušce výdržným napětím.

## 5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámit čtenáře s funkcí impulsního generátoru napětí, možnosti jeho využití a způsoby jeho propojení. Po pochopení funkce impulsního generátoru, bylo zde uvedeno jeho praktické využití, pro měření přeskokového a výdržného napětí pomocí tří různých zapojení generátoru.

V první kapitole, zaměřené na teoretickou část této práce, byly uvedeny metody provádění zkoušek výdržným napětím podle norem, znázornění zkušební atmosférického impulsu a jeho popis a rozsáhlá kapitola věnující se impulsnímu generátoru. Zde se mohl čtenář seznámit s principem činnosti impulsního generátoru a objasnění, jak je možné z přivedeného napětí 100 kV vytvořit 700 kV. Byl zde popsán celý měřicí systém, potřebný pro měření přeskokových nebo výdržných napětí. Součástí systému je také software, který hned po vzniklém přeskoku vykreslí rázovou vlnu. Uživatel je tedy hned schopen odečíst veškeré hodnoty potřebné pro další zpracování. Nechybí ani objasnění barevného značení jednotlivých rezistorů na generátoru. Každý, kdo bude mít možnost manipulovat s tímto generátorem určitě ocení jeho jednoduchou přestavbu ze sériových na paralelní nebo sérioparalelní zapojení. Také barevné značení rezistorů je velmi užitečné.

Praktická část má dvě kapitoly. První kapitola obsahovala teoretickou přípravu na zkušební měření, ve které bylo uvedeno, jakým způsobem a jaké zapojení jsme pro měření zvolili. Veškeré zapojení byly zdokumentovány fotograficky. Na fotografiích jsou vidět změny v propojení jednotlivých rezistorů. Nechyběl ani popis měřeného objektu a jeho technické parametry. Je zde rozepsán průběh zkoušky a bezpečnostní opatření při měření. Protože při měření se zachází s napětím stovek kilovoltů, celá laboratoř musí být pečlivě chráněna před vniknutím cizích osob do prostor, kde probíhá měření.

Druhá kapitola praktické části obsahovala naměřené hodnoty ve všech třech různých zapojení. V sériovém propojení docházelo k přeskokům při napětí kolem 120 kV, při sérioparalelním zapojení však docházelo k přeskoku až okolo 130 kV. Výsledky byly porovnány a byly vyneseny grafy. První graf znázorňoval srovnání všech tří měření přeskokového napětí na čas. Druhý grafy sloužili pro výpočet pravděpodobnostního napětí  $U_{50}$ . Nakonec bylo provedeno vyhodnocení celého měření.

Po teoretické přípravě a provedeném měření můžeme říci, že skleněný závěsný izolátor vyhověl zkouškám výdržným napětím. Podle výrobce je jeho výdržné napětí, suchým atmosférickým impulsem 100 kV. Při měření došlo k prvním přeskokům při 120 kV.

## 6. Literatura

- 1        *Norma ČSN IEC 60-1: Technika zkoušek vysokým napětím*
- 2        *Rozdělení impulsních generátoru* <http://www.haefely.com/10-products/10-impulse-voltage-testing.php>
- 3        *Uživatelský manuál k Impulsnímu napěťovému generátoru SGSA 700-35*
- 4        MACH, Veleslav: *Technika vysokého napětí*. Ostrava 2001
- 5        VEVERKA, Antonín: *Technika vysokých napětí*. SNTL Praha 1982
- 6        SKUBIS, Jerzy: *Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej*. Opole 1998



## Příloha A: Parametry impulsního generátoru

Maximální celkové nabíjecí napětí atmosférického impulsu*	700 kV
Maximální celkové nabíjecí napětí spínacího impulsu*	630 kV
Maximální energie nabíjecího napětí	35 kJ
Celková kapacita impulsu v zapojení S7	143 nF
Doba mezi impulsy	50 s
Tvar vlny: IEC 60-1	1,2 / 50 $\mu$ s 250 / 2500 $\mu$ s
IEC 76-3	20/200/500 $\mu$ s
IEC 230	1-5/50 $\mu$ s
Maximální nabíjecí napětí na jeden stupeň atmosférického impulsu*	100 kV
Maximální energie nabíjecího napětí na jeden stupeň	5 kJ
Kapacita jednoho stupně	1 $\mu$ F
Počet stupňů	7
Celková výška generátoru	3 m

\*Platí do 1000 m nad mořem

## Příloha B: Příslušenství generátoru

### 1) Dělič napětí

Dělič by měl být umístěn tak, aby nebyly v blízkosti žádné objekty (stěna, testovací objekt) ve stejné výšce jako je výška děliče (při zkoušce s vysokým napětím). Pokud je volná plocha k dalšímu objektu menší než polovina výšky děliče, musí se zkontrolovat vnější vlivy (kapacita, indukčnost).

### 2) Zemnicí propojení

Zemnicím páskem se musí propojit vývody děliče (jsou označeny maticí s křídly na výstupní straně) s laboratoří, kde je umístěn impulsní generátor ( místo pro připojení uzemnění je označeno). Pro zemnicí spojení se používá pásek s minimálním průměrem  $70 \text{ mm}^2$ . Tento pásek by měl být co nejkratší, jak je to jen možné. Musí být uzemněno veškeré zařízení propojené s impulsním generátorem

### 3) Kabely pro vysoké napětí

Dráha vysokého napětí vede z testovacího objektu do děliče. Pro měření atmosférického impulsu vyhovuje drát 1-2 mm.

### 4) Transformační převod

Upravit transformační převod na požadované napětí můžeme buď zkráceným okruhem na primární jednotce, nebo změnou nízkonapěťové jednotky.

### 5) Měřicí kabely

Měřicí kabel se připojuje k sekundární jednotce.

**Důležité:** Používejte vždy kabely, které vám byly dodány, systém není kalibrován na jiné typy kabelů (Kapacita a indukčnost ovlivní měření)

### 6) Tlumicí odpor

Pokud je systém vybaven tlumícím odporem: Měřicí kabel z něj se připojuje do vstupu označeného - požadovaný rozsah (pokud je zde více rozsahů). Měřicí zařízení se připojuje do stejného konektoru. Tento propojovací kabel musí být kratší než 2 m, aby nedošlo ke zkreslení měření.

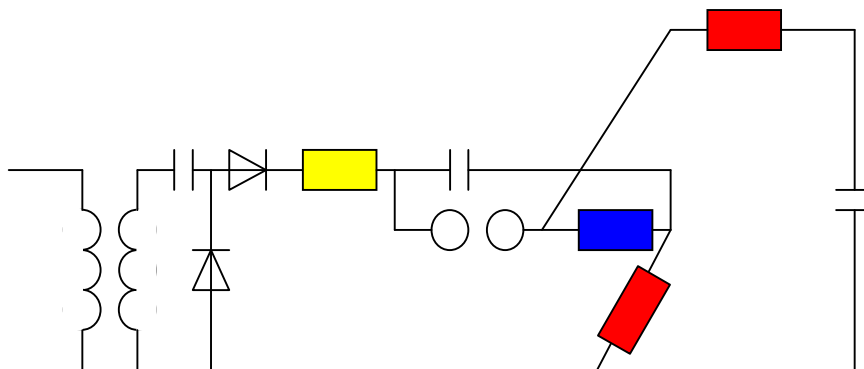
**Důležité:** Měřicí kabel mezi děličem a tlumícím odporem je kalibrován a není možné použít jiný typ kabelu (Impedance a kapacita musí mít hodnoty odpovídající hodnotám uvedeným v technických údajích.

### 7) Řídicí jednotka

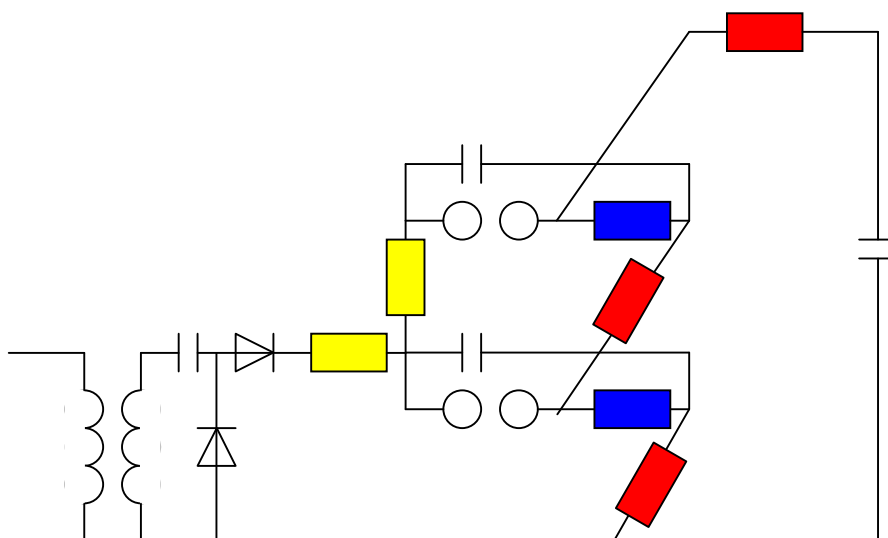
Zatížení, které řídicí jednotka snese, musí být podle hodnot uvedených v technických datech, jinak může dojít k ovlivnění nastaveného rozsahu a to vede k chybnému měření.

## Příloha C: Zapojení impulsního generátoru

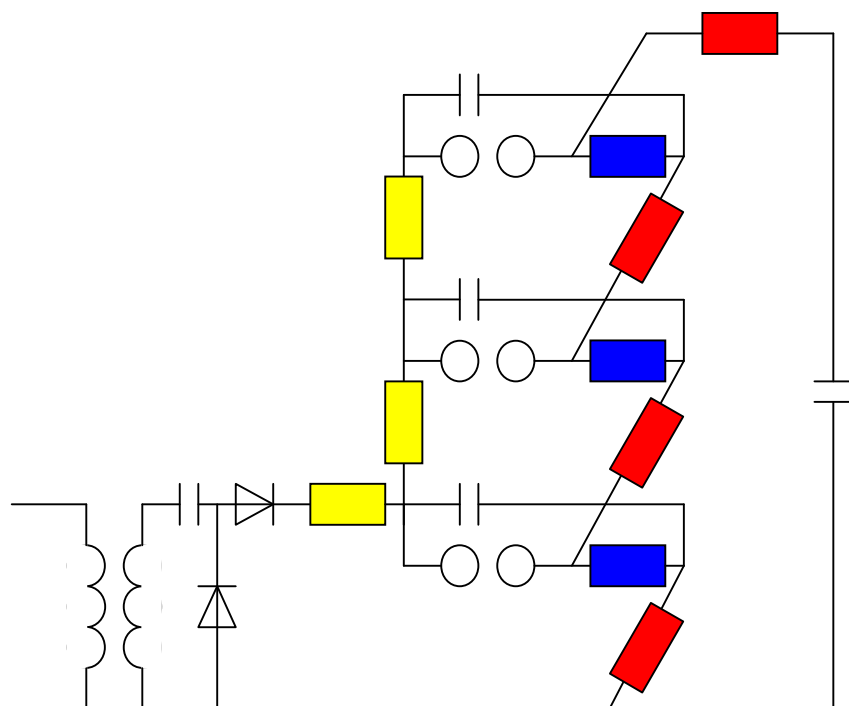
### Sériově S1



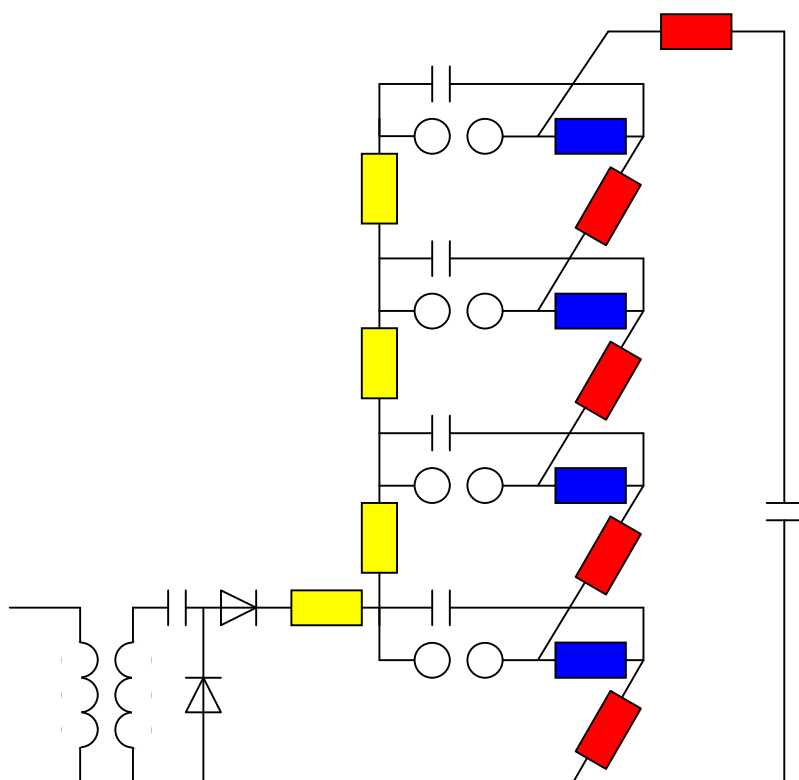
### Sériově S2



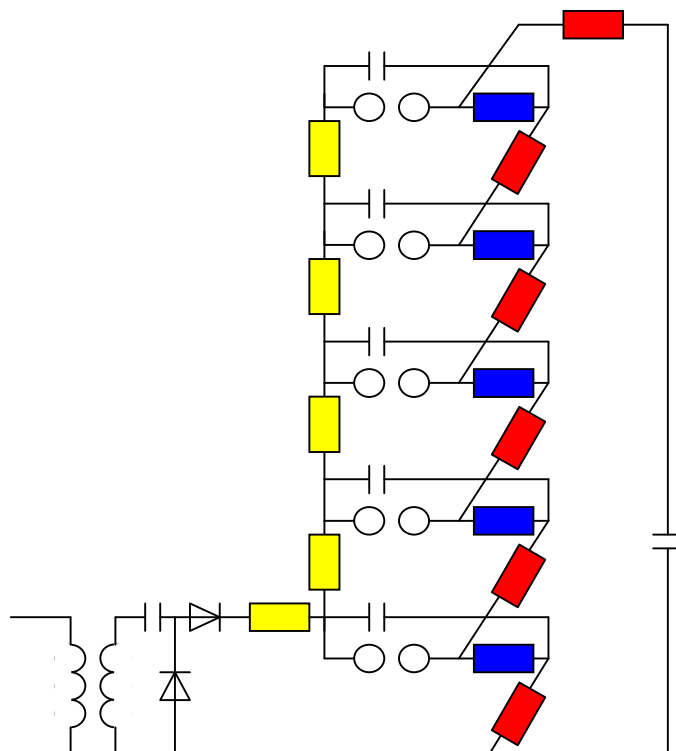
Sériově S3



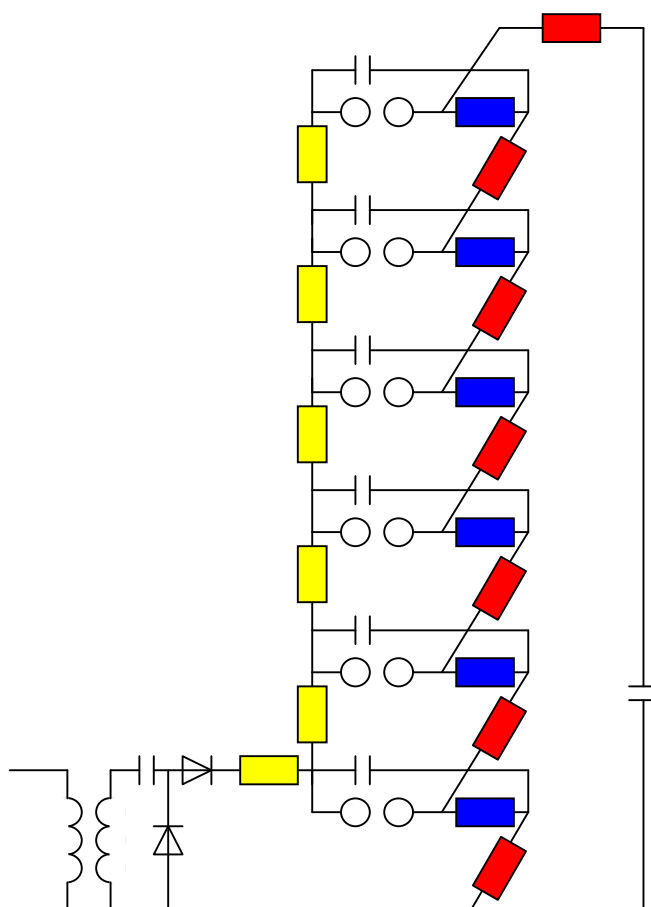
Sériově S4



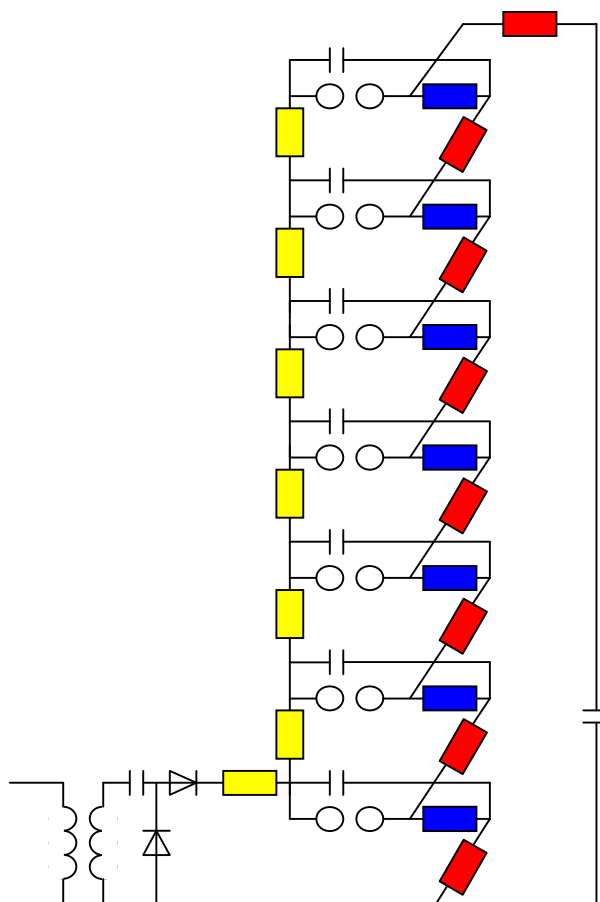
Sériově S5



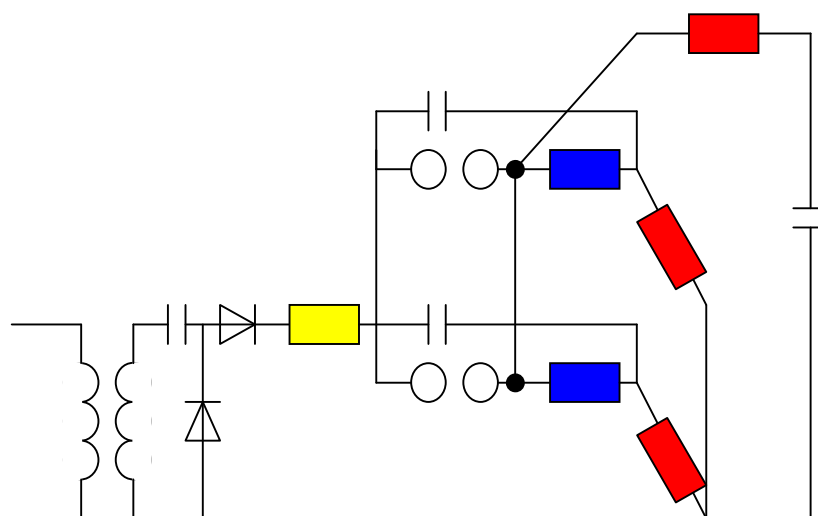
Sériově S6



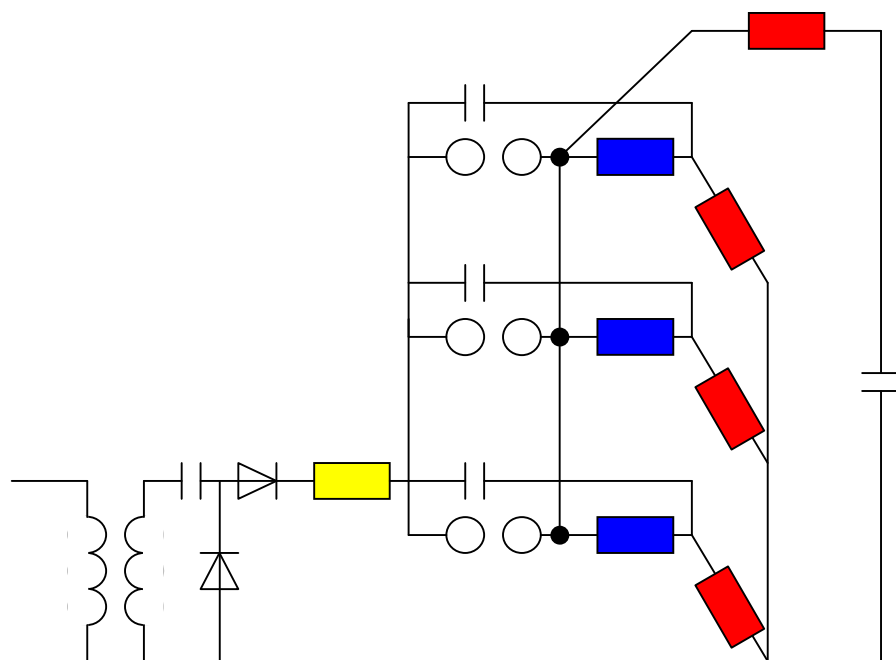
Sériově S7



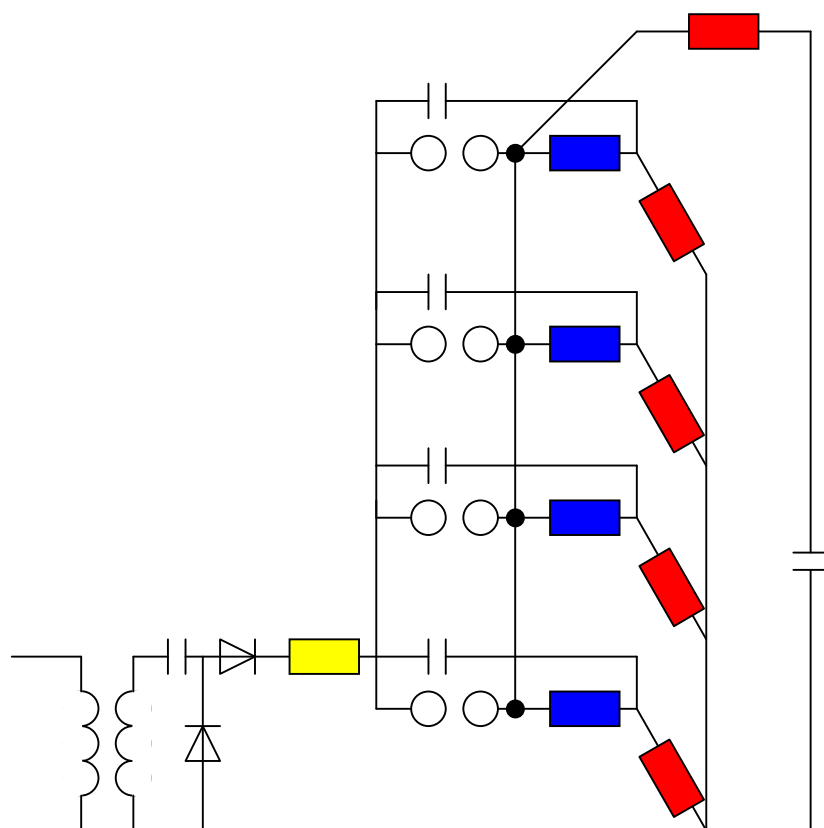
Paralelně P2



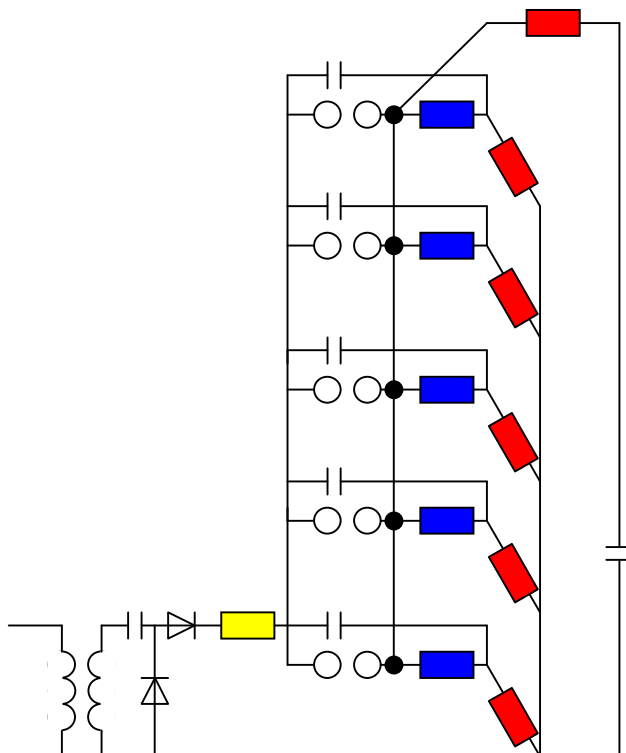
**Paralelně P3**



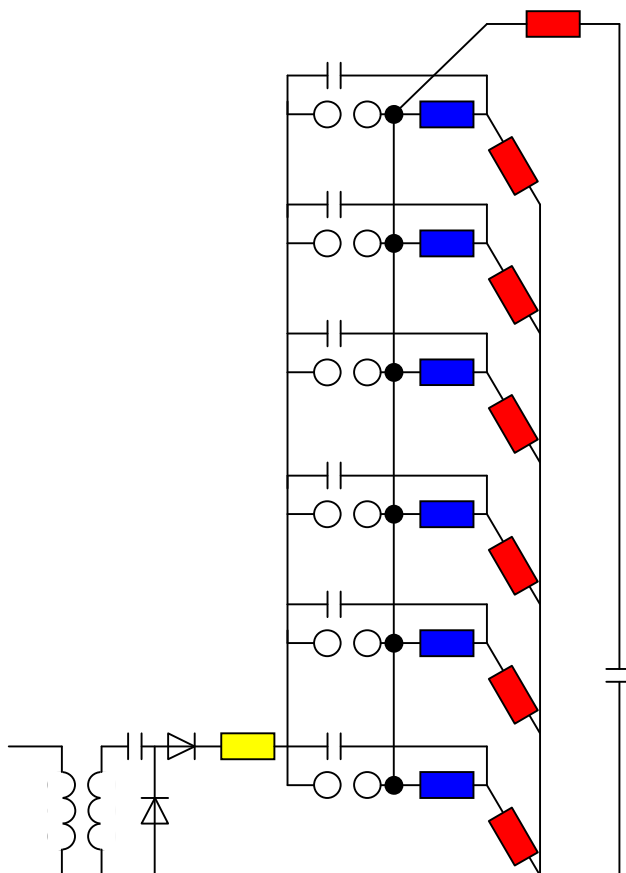
**Paralelně P4**



**Paralelně P5**

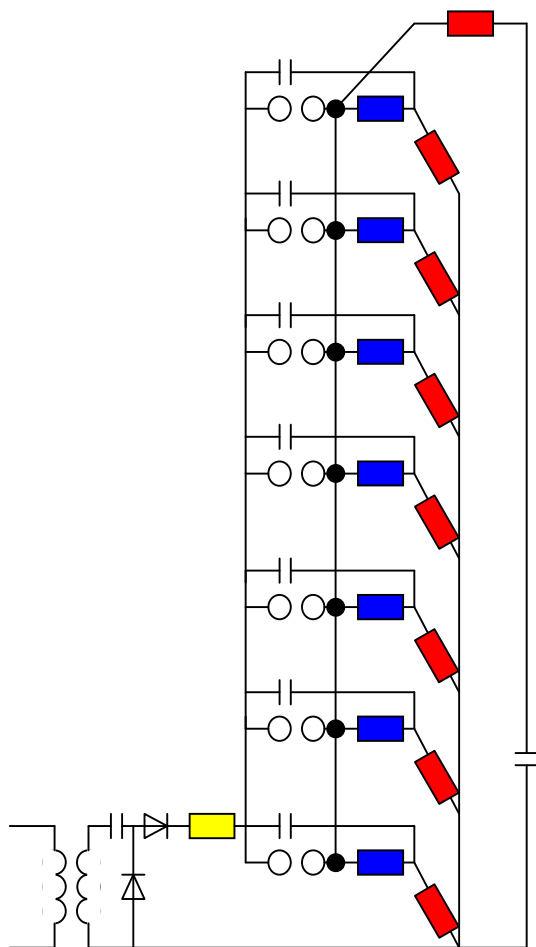


**Paralelně P6**

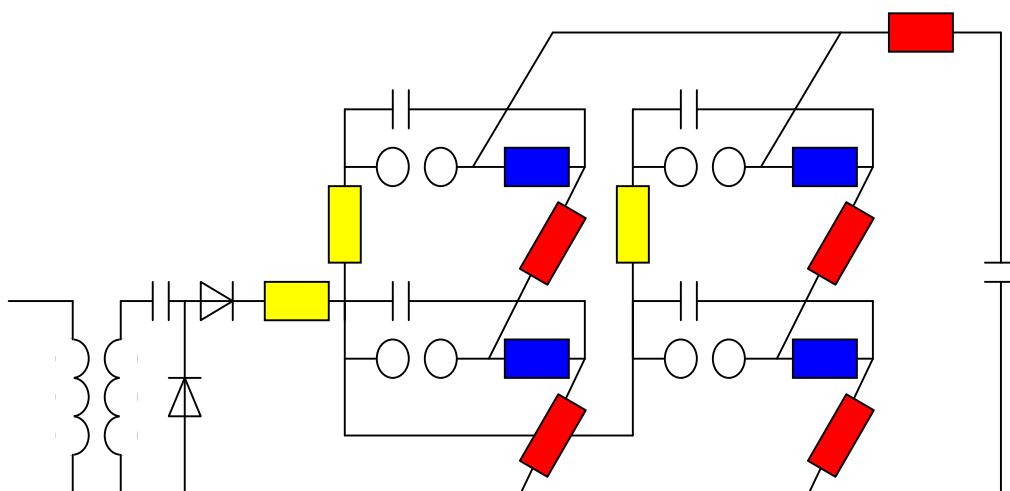




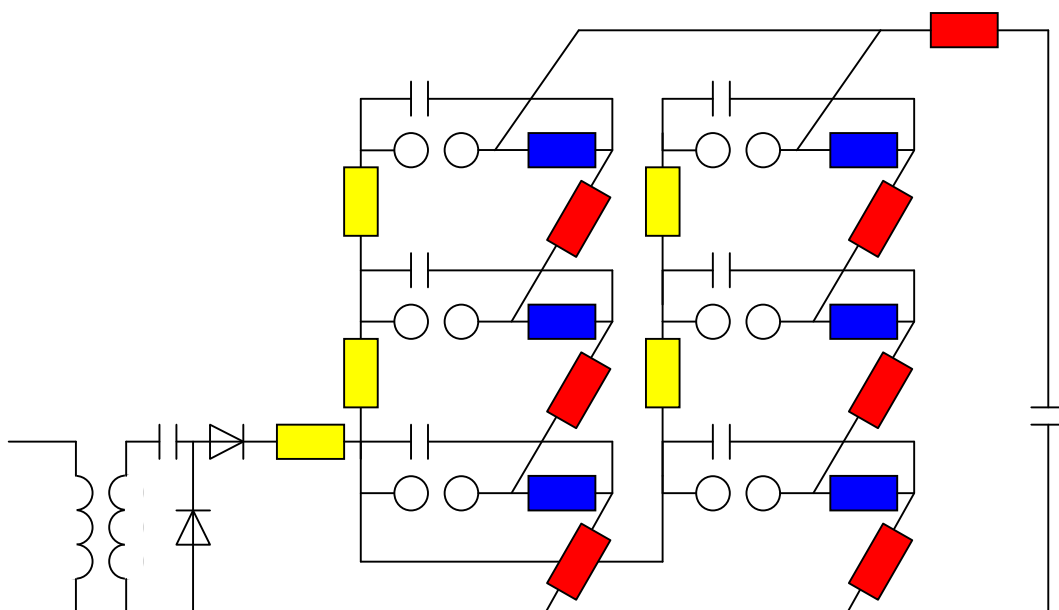
**Paralelně P7**



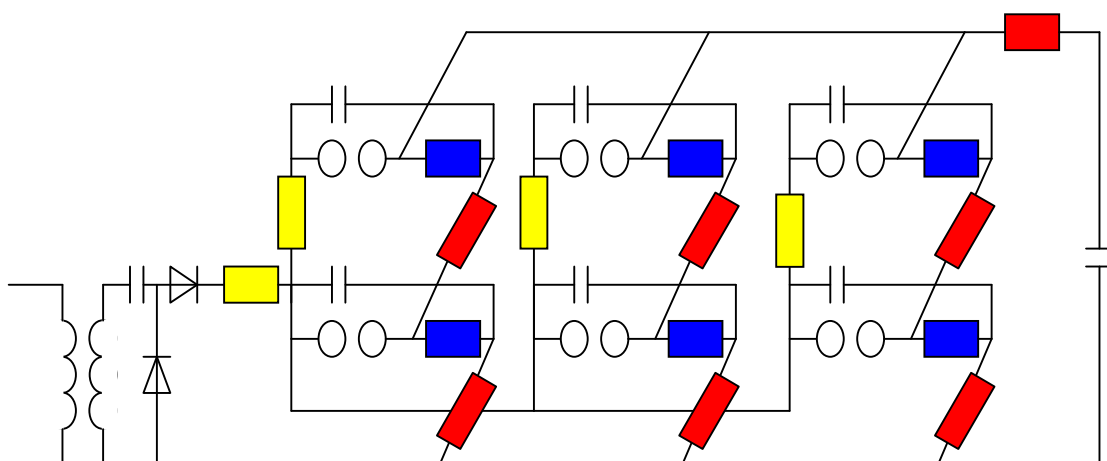
**Sérioparalelně S2 P2**



Sérioparalelně S3 P2



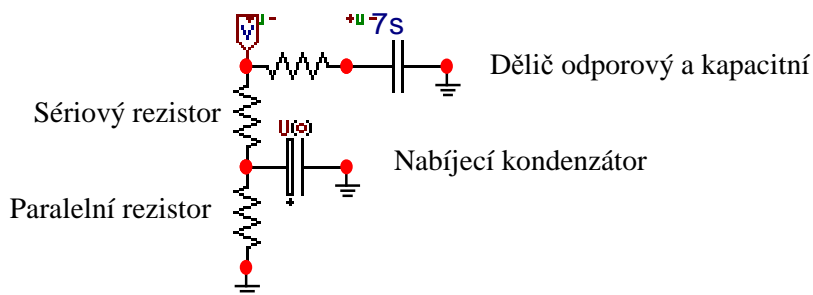
Sérioparalelně S2 P3



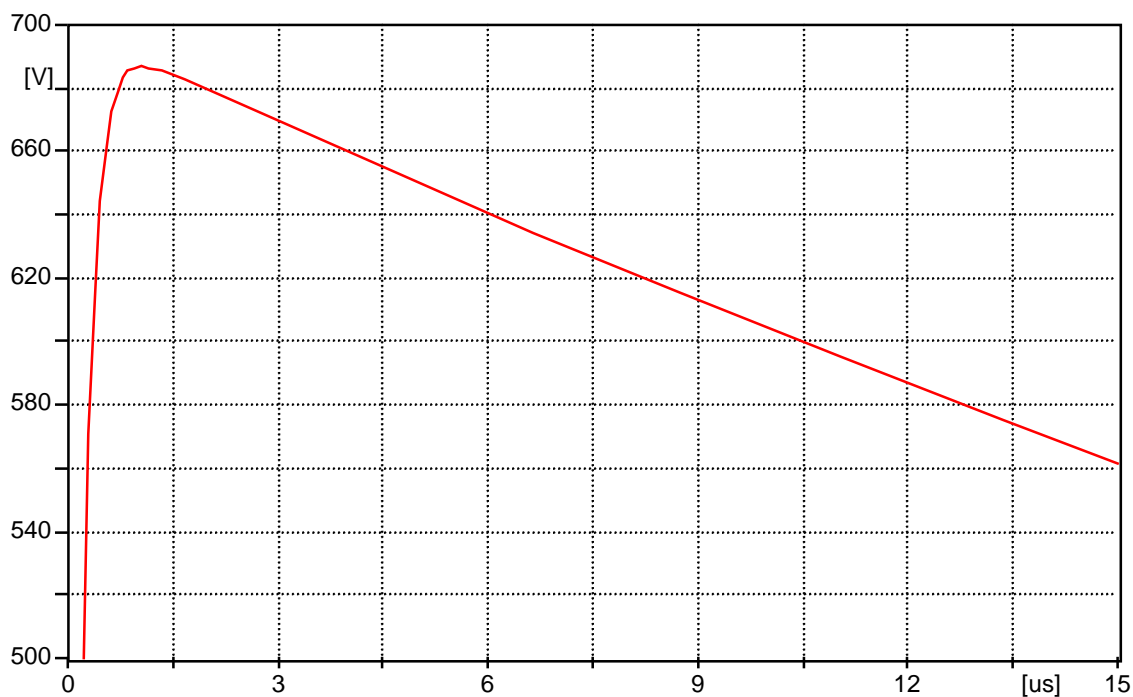
## Příloha D: Modely v programu ATP

### Sériově:

Na obrázku je znázorněno náhradní schéma pro zapojení S7. Schéma pro ostatní zapojení jsou stejná pouze se mění hodnoty rezistorů, kondenzátorů a nastavuje se přivedené napětí. Pro zapojení S7 je nejvyšší možné napětí 700 kV.

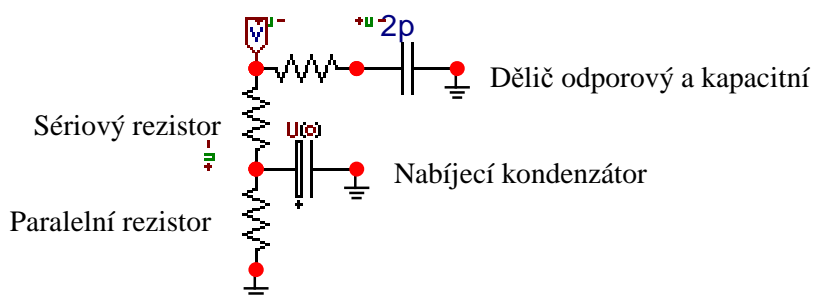


Zde je vykreslený průběh atmosférického impulsu. Amplituda impulsu je 687 kV.

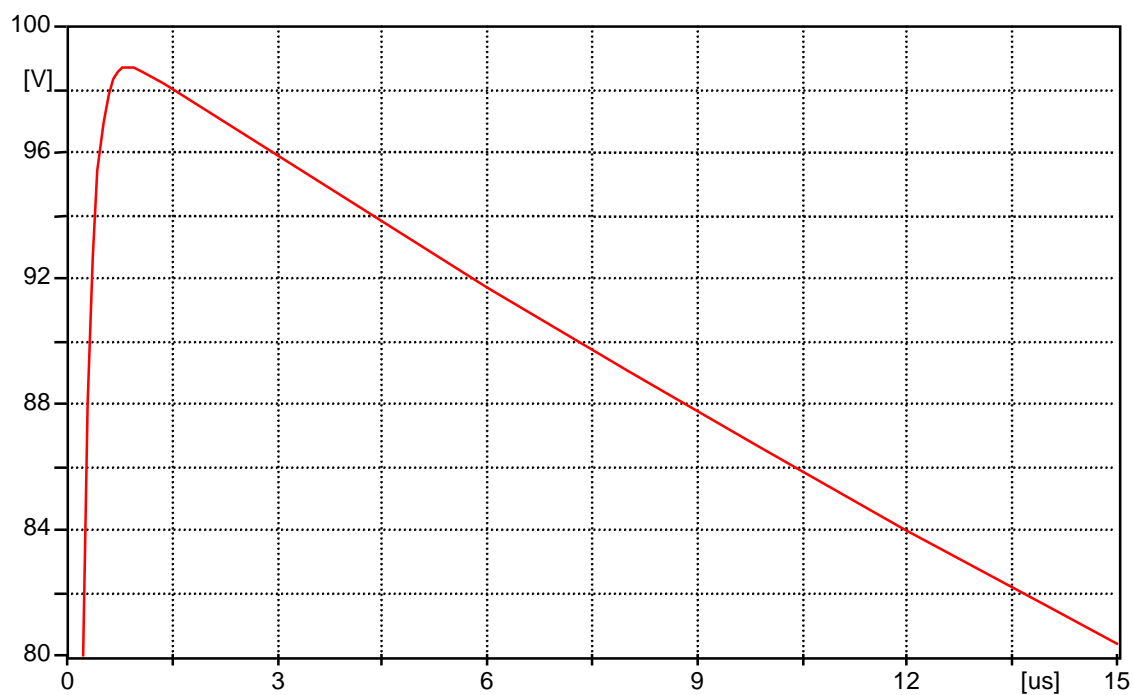


### Paralelně:

Na obrázku je znázorněno náhradní schéma pro zapojení P2. Schéma pro ostatní zapojení jsou stejná pouze se mění hodnoty rezistorů a kondenzátorů. Výsledné napětí je vždy 100 kV.

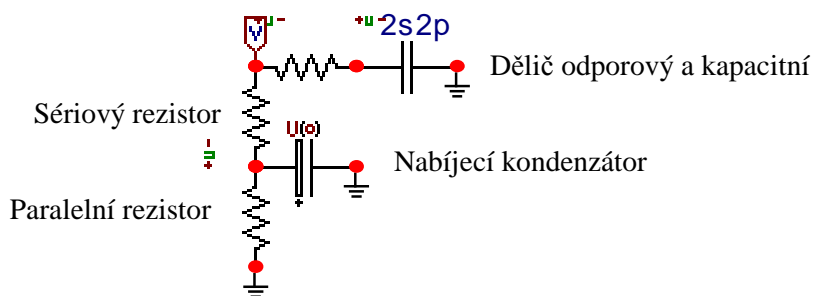


Zde je vykreslený průběh atmosférického impulsu. Amplituda impulsu je 98,7 kV.



### Sérioparalelně:

Na obrázku je znázorněno náhradní schéma pro zapojení S2P2. Schéma pro ostatní zapojení jsou stejná pouze se mění hodnoty rezistorů a kondenzátorů. Výsledné napětí pro zapojení S2P2 je 200 kV.



Zde je vykreslený průběh atmosférického impulsu. Amplituda impulsu je 197,4 kV.

